

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON NANOTÜPLERİN
ÜRETİLMESİ VE GAZ ALGILAMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Görkem YÜCE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2009**

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON NANOTÜPLERİN
ÜRETİLMESİ VE GAZ ALGILAMA
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Görkem YÜCE
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK**

**GEBZE
2009**



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02.07.2009 tarih ve 2009/15 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17.09.2009 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Görkem YÜCE'nin tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK

ÜYE

: Prof. Dr. Rauf SÜLEYMANLI

ÜYE

: Doç. Dr. Metin USTA

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../2009 tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ KONUSU : KARBON NANOTÜPLERİN ÜRETİLMESİ VE GAZ ALGILAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

TEZ YAZARI : Görkem YÜCE

Bu çalışmada nanoteknolojinin temel yapı taşlarında biri sayılan karbon nanotüplerin belli bir sıcaklık ortamında düşük konsantrasyonlu gazları algılama özellikleri incelenmiştir.

Karbon nanotüplerin elde edilebilmesi için Kimyasal Buhar Biriktirme Yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntemle karbon nanotüp elde edebilmek için yüksek sıcaklıkta bir fırın ortamı, taşıyıcı gaz olarak azot ve hidrojen ve karbon kaynağı olarak da asetilen gazları kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıkta bu gazlar, ortam için oldukça tehlikeli olacağından literatür araştırmaları sonucunda en uygun gaz konsantrasyonu belirlenip daha sonra 600-700⁰C arasında farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde karbon nanotüp üretimi çalışmaları yapılmıştır.

Karbon nanotüpler Si/SiO₂ ve Si/Alümina ince film alttaşlar üzerinde biriktirilmiştir. Bu ince filmlerin üzerine, nanotüplerin büyütülmesinde katalizör madde olarak kobalt ince film kaplanmıştır. Elde edilen örneklerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) analizleri yapılmış ve katalizör kullanımının nanotüplerin boyutunda önemli rol oynadığı gözlemlenmiştir. SEM analizleri sonucunda çapları 50-100 nm arasında değişen karbon nanotüpler üretilmiştir.

Üretilen karbon nanotüpler kapalı bir hücre içerisine yerleştirilmiş ve iki ucundan gümüş kontak alınarak üzerinden farklı konsantrasyonlarda gaz geçişi sağlanmıştır. Gaz konsantrasyonunun değişimiyle karbon nanotüplerin elektriksel özelliklerindeki değişimi ve algılama özellikleri incelenmiştir.

SUMMARY

THESIS TITLE : PRODUCTION OF CARBON NANOTUBES AND INVESTIGATION OF THEIR GAS SENSITIVITY PROPERTIES.

THESIS AUTHOR : Görkem YÜCE

In this study the gas sensing properties of carbon nanotubes which are the primary building blocks of nanotechnology for low concentration gases.

Carbon nanotubes were produced by Chemical Vapor Deposition. To produce carbon nanotubes by this method there should be an environment in the chamber at high temperature. In this process nitrogen and hydrogen was used as inert gas acetylene was used for carbon source. These gases are very dangerous at high temperature. According to the literature study the optimum gas concentration and deposition temperature were investigated. Carbon nanotubes were produced between 600°C and 700°C. The process time were also changed

Carbon nanotubes were grown on the Si/SiO₂ and Si/alumina substrates. Cobalt thin film was grown on the substrates as catalyst. The samples were examined by Scanning Electron Microcopy (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy. According to the images catalyst has the advantage for size of carbon nanotubes. Diameters of nanotubes are between 50 nm and 100 nm

After the production carbon nanotubes were examined for sensitivity of hydrogen, nitrogen, ethanol gases and humidity with different concentration. At this study the electrical properties of carbon nanotubes were investigated with changing of concentration.

TEŞEKKÜR

Öncelikle ‘Karbon Nanotüplerin Üretilmesi ve Gaz Algılama Özelliklerinin Araştırılması’ konulu tez çalışmasında bana rehberlik eden, sonuca ulaşabilmem adına bilgi ve tecrübeleri ile her zaman yol gösteren Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü öğretim üyelerinden değerli hocam Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın özellikle deney aşamasında sağladığı katkılarından dolayı TÜBİTAK-MAM Kimya Bölümü’nden Uzman Araştırmacı Hayrettin YÜZER’e ve tez süresince finansal desteğinden ötürü TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Nanoteknoloji Araştırma Merkezi’nde görev alan öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK’e ve yardımlarından dolayı Arş. Gör. Ali Şems AHSEN’e teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, deneyimlerini paylaşmaktan çekinmeyen özellikle de nanotüp üretimi ve gaz ölçümleri aşamasında sabırla ve özenle sarf ettiği emeklerinden dolayı Arş. Gör. Necmettin KILINÇ’a teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmanın henüz daha başındayken nasıl bir yol izleyeceğim konusunda her zaman fikirlerini paylaşan, çalışmalarımdayardımcı olmakla kalmayıp pek çok konuda fırsat yaratmaya çalışan, ortaya çıkan sorunlar karşısında kendi bilgi ve tecrübelerini de paylaşarak çözüm üretmemde desteğini esirgemeyen ve hepsinden önemlisi yüksek lisans öğrenimim süresince sıkıntılarım da sevinçlerim de yanımda olan değerli çalışma arkadaşım, biricik dostum Nevin TAŞALTIN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Sadullah ÖZTÜRK ve Erdem ŞENNİK’e gerek ders aşamamda gerekse tez çalışmam süresince yardımlarını ve arkadaşlıklarını esirgemedikleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak hayatımın her aşamasında yanımda olan, bu güne kadar elde ettiğim her başarının, yaşadığım her güzelliğin gizli mimarları olduklarını bildiğim aileme ve bana inanmaktan asla vazgeçmeyen babama şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1.GİRİŞ	1
AMAÇ	5
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1. Karbon Maddeler	6
2.1.1. Elmas	6
2.1.2. Grafit	7
2.1.3. Fulleren	8
2.1.4. Grafen	8
2.2. Karbon Nanotüpler	9
2.2.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler (Single Walled Carbon Nanotubes-SWCNT's)	10
2.2.2. Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler (Multi Walled Carbon Nanotubes – MWCNT's)	13
2.2.3. Karbon Nanotüplerin Elektriksel Özellikleri	13
2.2.4. Karbon Nanotüplerin Mekanik Özellikleri	15
2.3. Karbon Nanotüplerin Sentezlenme Yöntemleri	16
2.3.1. Ark Boşalım (Arc Discharge) Yöntemi	17
2.3.2. Lazer Aşındırma (Laser Ablation) Yöntemi	18
2.3.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD) Yöntemi	19
2.4. Karbon Nanotüplerin Gaz Algılama Özellikleri	20
3. DENEYSEL YÖNTEM	23
3.1. Karbon Nanotüplerin Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Üretimi	23
3.1.1. Si/Alimuna Altaşların Hazırlanışı	23

3.1.2. Si/Alimuna Yüzeyin Kobalt Katalizör Kaplanması	24
3.1.3. Si/SiO ₂ İnce Filmlerin Miknatıssal Püskürtme (Magnetron Sputtering) Yöntemi ile Kobalt Katalizörle Kaplanması	26
3.1.4. Karbon Nanotüplerin İnce Filmler Üzerinde Büyütülmesi	27
3.2. Gaz Algılma İşlemleri	28
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	30
4.1. Si/ Alümina Alttaşlarının İncelenmesi	30
4.2. Kobalt Katalizörle Kaplanan Yüzeylerin Analizi	31
4.3. Elde Edilen Karbon Nanotüplerin Analizleri	33
4.4. Gaz Ölçümü Analizleri	37
4.4.1. 23°C sıcaklıkta NO ₂ ölçümü	37
4.4.2. 25°C sıcaklıkta %0,75 konsantrasyonunda nem ölçümü	40
4.4.3. 150°C’de H ₂ , etanol ve Nem Ölçümleri	41
5. SONUÇ ve YORUM	43
5.1. Kobalt Kaplanması Yöntemlerinin Değerlendirilmesi	43
5.2. Karbon Nanotüp Üretimi Aşamasının Değerlendirilmesi	43
5.3. Karbon Nanotüplerin Gaz Algılama Özelliklerinin Değerlendirilmesi	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a1,a2	: Birim vektör
Ch	: kiral vektör
Nm	: nanometre
A	: Amper
V	: Uygulanan gerilim
R	: Direnç
S	: Duyarlılık
AET	: Alan Etkili Transistör
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
CNT	: Carbon Nanotube (Karbon Nanotüp)
DC	: Doğru Akım
EDX	: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
MWCNT	: Multi Walled Carbon Nanotube (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp)
SWCNT	: Single Walled Carbon Nanotube (Tek Duvarlı Karbon Nanotüp)
RF	: Radyo Frekansı
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
ppm	: Part per million (milyonda bir parçacık)
sccm	: Standard Cubic Centimeters per Minute (Dakikada standart cm ³)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Elmas yapısı	6
2.2 Grafitin kristal yapısı	7
2.3 Fulleren yapısı a)C60 fulleren yapısı b)C20 fulleren yapısı	8
2.4 Karbon nanotüplerin sınıflandırılması	11
2.5 Tek duvarlı karbon nanotüplerin grafen yüzeyi	12
2.6 Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler	13
2.7 Ark Boşalım	17
2.8 Ark boşalım yöntemi ile üretilen karbon nanofiberler	18
2.9 Lazer Aşındırma	19
2.10. CVD sistemi	19
2.11. CNT transistör	22
2.12. Karbon nanotüplerin gaz algılama grafiği	22
3.1. Anodizasyon sistemi	24
3.2 Spin kaplama yöntemi	25
3.3. Püskürtme sistemi	26
3.4. Kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition-CVD) sistemi	27
3.5. Ölçüm Sisteminin Şematik Görünümü	29
4.1 Anodizasyon sonrasında oluşan Si/ Alümina tabanlı nanogözeneklerin yüzey görüntüsü	30
4.2 Alümina ince film yüzeyine kaplanan kobalt filmin SEM görüntüsü	31
4.3 Alümina ince film yüzeyinde gözenekler üzerine kaplanan kobalt parçacıkların filmin SEM görüntüsü	32
4.4 Si/Alümina/kobalt film örneğinin EDX analizi	32
4.5 30 dakika süresince 10 sccm asetilen ve 90 sccm hidrojen gazı gönderilen Si/SiO ₂ /Co ince film üzerinde oluşan karbon nanoküreler	33
4.6 30 dakika süresince 10 sccm asetilen ve 90 sccm hidrojen gazı gönderilen Si/SiO ₂ /Co ince film üzerinde oluşan karbon nano küreler	34
4.7 Si/SiO ₂ ince filmin EDX görüntüsü	34
4.8 Karbon nanotüplerin EDX görüntüsü	35

4.9 a) Si/SiO ₂ /Co ince filmin üzerinde büyütülen karbon nanotüplerin SEM görüntüsü	35
4.9 b) Si/SiO ₂ /Co ince filmin üzerinde büyütülen karbon nanotüplerin yüksek büyütme SEM görüntüsü	36
4.10 a) Si / Alimuna/ Co ince filmlerin üzerinde oluşan karbon nanotüplerin SEM görüntüsü	36
4.10 b) Si / Alimuna/ Co ince filmlerin üzerinde oluşan karbon nanotüplerin yüksek büyütme SEM görüntüsü	37
4.11 Karbon nanotüplerin 23°C’de NO ₂ gazının konsantrasyonuna bağlı zamana karşılık direncin değişimi	38
4.12 Karbon nanotüplerin 23°C’de NO ₂ gazının konsantrasyonuna bağlı zamana karşılık direncin değişimi (R-t) grafiği	39
4.13 23°C’de NO ₂ gazının konsantrasyonuna karşılık duyarlılık grafiği	40
4.14. 25°C sıcaklıkta %0,75 konsantrasyonunda nemin zamana karşılık direnç değişimi grafiği	41
4.15. 150°C 1000 ppm etanol ölçümü	41
4.16. 150°C de H ₂ ölçümü	42
4.17. 150°C nem ölçümü	42

1.GİRİŞ

Nanoteknoloji nanometre ($1 \text{ nm}=10^{-9} \text{ m}$) ölçeğindeki fiziksel, kimyasal ve biyolojik olayların anlaşılması, kontrolü ve üretimi amacıyla, fonksiyonel materyallerin, cihazların ve sistemlerin geliştirilmesidir [1]. Nano biriminin daha iyi anlaşılabilmesi için şöyle bir örnek verebiliriz. Bir saç teli yaklaşık 80 bin nanometre kalınlığındadır. Nanoteknoloji; maddenin nanometre ölçeğinde yani atomsal, moleküler ve supramoleküler yapılar düzeyinde denetlenmesi yoluyla yeni malzeme, cihaz ve sistemlerin tasarlanmasını ve üretilmesini konu alan bir teknoloji dalıdır. Maddeleri moleküler ya da nanometre düzeyinde ele alan bir mühendislik bilimi olan nanoteknoloji, daha güçlü ve daha hafif elektronik materyallerin kullanıldığı yeni bir çağ vaat ederek bilim adamlarının son yıllarda umutlarını arttırmaya devam etmektedir. Bilim insanları ve mühendisleri her gün daha küçük boyutlara inmeye, daha az yer kaplayan, daha az enerji harcayarak daha hızlı çalışabilen aygıtlar yapmaya zorlamıştır.

Bir aygıtta kullanılan malzemenin boyutu küçüldükçe, çalışma hızı da artar ve o malzemenin yeni fiziksel özellikleri ortaya çıkar. Boyutlar nanometre ölçeklerine yaklaşırken, malzemenin fiziksel özellikleri kuantum mekaniğinin kontrolüne girip, elektron durumlarının fazı ve enerji spektrumunun kesikli yapısı daha belirgin hale gelmektedir. Daha da önemlisi, malzemeyi oluşturan atom sayıları 100'ler düzeyine inince, atomsal yapının geometrisi, hatta atom sayısının kendisi bile fiziksel özelliklerin belirlenmesinde etken olmaktadır. Örneğin; yarı iletken olarak bilinen ve çağımızın en önemli malzemesi olan silisyumdan yapılan bir telin çapı nanometreye yaklaşırken tel iletken bir karakter sergilemektedir [2].

Nanoteknolojinin en önemli konularından biri karbon nanotüpleridir. Karbon nanotüpler önemli elektronik ve mekanik özelliklere sahiptir. Karbon nanotüpler grafit silindirden, karbon atomlarının birleşmesiyle oluşan futbol topu şeklinde yapılardır. Bu topların diğer atom veya moleküllerle yaptığı bileşiklere “fulleren” denir. Karbon nanotüpler çelikten daha serttir ve plastik kadar esnektir. Enerjileri şimdiye kadar keşfedilen tüm maddelere göre daha iyi iletirler.

Karbon nanotüplerin bulunması 1985 yılında 60 ya da daha fazla karbon atomunun birbirine bağlanmasıyla yaratılan futbol topu şeklindeki moleküllerin keşfiyle başlamıştır. R. Buckminster'in fullerenin mimari tasarımı nedeniyle, bu futbol topu şekilli moleküllere "Bucky-Balls" denmektedir. Böyle topların diğer atom ve moleküllerle yaptığı birleşimler de fulleren olarak adlandırılır. Bu keşfin ardından birçok laboratuarda bucky-ball moleküllerinin sıcak karbon buharından yoğunlaşması için farklı metotlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır ve süreç koşullarında bazı küçük değişiklikler çeşitli şekil ve boyutta delikli, kaba ve küresel sonuçlar vermiştir. Fakat ilk tüpsel moleküller, fullerenin ark-buharlaştırma sentezi sırasında keşfedilmiştir.

1985 yılında H.W. Kroto, R.E. Smalley (Rice Üniversitesi)'den oluşan bir grup karbon atomlarını izole etmeyi başararak, fullerenin yapısının tümüyle bilinmesine giden ilk adımları atmışlardır. Bu çalışmalarıyla 1996 yılında da Nobel Fizik Ödülü'nün sahibi olmuşlardır.

1991 yılında Sumio Iijima nanotüpleri ilk olarak keşfetmiştir [3]. Daha da önemlisi, belirli koşullar altında bu tüpler kendilerini sıçrayan bir Bucky-Ball'un iki yarısıyla birleşerek mühürlemektedir. Kısa süre sonra Iijima'nın laboratuvarlarında ark-buharlaştırma koşulları değiştirilerek daha büyük miktarlarda nanotüplerin nasıl üretileceği gösterilmiştir.

Fakat standart ark-buharlaştırma yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi sadece çok katmanlı tüpler üretebilmiştir. Bazı araştırmalardan sonra görüldü ki grafit elektrotlarına kobalt gibi metallerin eklenmesi tek katmanlı son derece iyi tüplerin elde edilmesi ile sonuçlanmıştır.

Tek katmanlı nanotüplerin sentezi karbon nanotüplerin gelişiminde temel bir olaydır. Rice Üniversitesi'ndeki grubun Nobel ödüllü çalışması düzenli tek duvarlı (katmanlı) nanotüp demetleri üretmek için görece etkili bir yol bulmaları karbon nanotüp üzerine miktarsal deneysel çalışmaların yapılması için yeni fırsatlar açmıştır. Bu düzenli nanotüpler bir karbon hedefin 1200°C deki fırın içinde lazerle buharlaştırılması ile hazırlanmıştır.

Daha sonra da Fransa’da yapılan çalışmalarda tek duvarlı benzer nanotüp ışınları büyötmek için bir karbon-ark metodu geliştirilmiştir. Burada, düzenli nanotüpler iyonize bir karbon plazmadan da üretilebilmiştir.

Karbon nanotüpler tesadüfen keşfedilmiş olmasına rağmen dünyanın her bir yanında özellikleri yoğun bir şekilde araştırılmaya başlanmıştır. Böylece bilim adamları karbon nanotüplerin nano ölçekte birçok fiziksel, kimyasal, yapısal, elektronik ve optik özellikleri olduğunu keşfetmiştir.

Nanoteknolojinin amaçları kısaca aşağıdaki gibi verilebilir:

- Nanometre ölçekli yapıların analizi ve imalatı
- Nanometre boyutunda yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması,
- Nano ölçekli cihazların geliştirilmesi,
- Uygun yöntemler bulunarak nanoskopik ve makroskopik dünya arasındaki bağın kurulması [2].

Nanoteknolojinin potansiyel kullanım alanları ise şu şekilde sıralanabilir;

- Mikrosensörlerin, mikromakinaların, optoelektronik elemanların imalatı ve uygun şekilde bir araya getirilmesinde,
- Lazer yapımında,
- Manyetikleştirilmiş nano katmanları en ufak değişiklikleri fark edecek şekilde bir çip içine entegre edilip, trafik sensörü olarak uçak ve otomobilleri tanımada ve manyetik alanlarına bakarak tiplerini de belirleyebilmede,
- Medikal alanında: Mikro cerrahide (göz, beyin vb.), diagnostik kitlerde, yüzey karakterizasyonu ve modifikasyonu, mikroorganizmaların taşınmasında, kanserli hücrelerin tedavisinde,
- DNA modifikasyonu vb. bölümlerde,
- Kozmetik sanayide,
- Dokumada kullanılacak olan elektronik fiberler sayesinde, istenildiğinde renk değiştirilebilen vücudumuzu zararlı ışınlardan koruyan hatta özel polimerler

sayesinde terin emilip vücudumuzun kuru kalmasını sağlayan, su tutmayan giysilerin üretiminde,

- Mikromakinalar sayesinde de bilgisayar teknolojisinde,
- Kapasitör, transistör ve fotodiyot yapımında ve güneş pillerinde,
- İlaç endüstrisinde,
- Yüksek çözünürlüğe sahip ölçü aletlerinin yapımında uygulama alanları bulunmaktadır [2].

AMAÇ

Tezin amacı, karbon nanotüpler üretilmesi ve bu nanoyapılarla herhangi bir ortamda bulunan düşük konsantrasyonlu gaz/gazların algılanma özelliklerinin incelenmesidir.

Gaz sensörleri bir kimyasal hali giriş sinyali olarak alıp bir elektriksel çıkış sinyaline çevirirler. Kimyasal gaz sensörleri kimya ve gıda sanayisinde işlem kontrolünden atmosferik kirliliğe yol açan gazların algılanmasına kadar farklı alanlarda uygulanabilmektedirler. Konunun bu kadar geniş olması seçici algılayıcı malzemelerin önemini ortaya koymaktadır [4]. Son yıllarda sensör boyutları küçültülerek karbon nanotüp gaz sensörleri üzerinde odaklanılmıştır. Literatür araştırmalarından edinilen bilgilere göre, karbon nanotüpler, H_2 , CO ve CH_4 gibi bazı hidrokarbonları oldukça yüksek duyarlılıkla algılamaktadırlar. [5].

Karbon nanotüplerin sentezlenmesinde Si / SiO_2 ve Si / alümina ince filmleri kullanılmaktadır. Bu yüzeylere karbon nanotüpün oluşabilmesi için kobalt katalizör malzeme olarak kullanılır. Kobaltın alümina tozlarının veya ince film alüminanın yüzeyine kaplanması için çeşitli yöntemler mevcuttur. Kobalt katalizörünün kaplandığı Si / SiO_2 ve Si / alümina yüzeyine, $600^\circ C$ sıcaklıkta, belirli gaz konsantrasyonlarındaki C_2H_2 ve H_2 gazlarının geçiş yaptığı bir ortamda CVD tekniğiyle karbon nanotüpler sentezlenmektedir [6 – 8].

Elde edilecek ince filmler kullanılarak, bu yüzeylere karbon nanotüpler sentezlenecektir. Karbon nanotüplerin sentezlenmesi, belli bir sıcaklık ve gaz ortamında, CVD (Chemical Vapor Deposition) tekniği kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bu karbon nanotüplerle gaz algılama özellikleri farklı ölçüm parametrelerine göre test edilip incelenecektir.

Nanoyapıların üretilmesinde, uygulanan gaz konsantrasyonu ve süre gibi parametreler nanotüplerin morfolojik yapısı için oldukça önemli olduğundan, nanotüplerin kontrollü olarak elde edilmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yüzey analizleri yapılacaktır.

2.GENEL BİLGİLER

2.1. Karbon Maddeler

Canlıların temel taşı olan karbon, nanoyapı hali ile nanoteknoloji çağını başlatmadan önce doğal olarak bulunduğu gibi laboratuvar şartlarında da üretilmiştir. Karbon sonlu boyutlarda nanometre seviyesinde sağlam yapılara da sahip olmasından dolayı ayrıcalıklı bir element olup, periyodik tablodaki elementler içinde sıfır boyuttan üç boyuta kadar izomerleri bulunan tek elementtir [9]. Karbonun genel yapıları grafit, elmas, karbon nanofiberler, amorf karbon, fulleren (C_{60}) ve karbon nanotüpler şeklindedir.

2.1.1. Elmas

Gerek kendine has güzelliği gerekse fiziksel özellikleriyle elmas oldukça ilgi çekici bir elementtir. Farklı kristal yapılarında bulunan elmas oda sıcaklığında ve atmosfer basıncı altında yarı karardır. Kristal yapısı olarak çinko sülfürün bir çeşididir ve kübik bir kristal yapısı vardır. **Şekil 2.1**'de elmasın kristal yapısı gösterilmiştir. Fiziksel özellikleri ile elmas oldukça çekici bir elementtir. Bilinen en sağlam maddedir. Elektrik iletkenliği oldukça düşüktür. Karbon nanotüplerin keşfine kadar en iyi ısı iletkenliği olan madde olarak biliniyordu. Tüm bu özellikleri kristal yapısından ve atomları arasındaki güçlü kovalent bağlarından kaynaklanır.

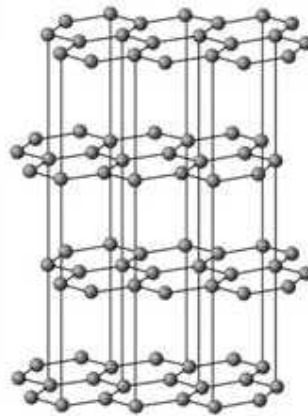


Şekil 2.1 Elmas yapısı

Geçtiğimiz son on yılda elmas ince film üretilmiştir. Bu ince filmlerin mekaniksel, fiziksel ve optik özellikleri bulk elmasinkine benzemektedir. Elmas çeşitli kristal yapılarında bulunabilir. Bu yapıların büyüklükleri farklı olabileceği gibi amorf karbon veya grafit de bulunabilir. Elmas ince filmler yüzey sağlamlığını arttırmak için bıçaklar, matkap yüzeyleri gibi kesici aletlerin kaplanmasında kullanılabilir. Bazı lensler ve radarlar yüzeyin şeffaflığı korunarak elmas ince filmlerle kaplanabilir. Tüm bunların yanında elmas ince filmlerin potansiyel kullanım alanları olarak makine parçaları, kayıt diskleri ve yarı iletken malzemelerin alttaşları da sayılabilir[10].

2.1.2. Grafit

Karbonun bir diğer kristal hali de grafitir. Elmastan farklı olarak grafit oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında daha karardır. Grafitin kristal yapısı **Şekil2.2**'de de görüldüğü gibi, karbon atomlarının altıgen şeklinde dizilmesiyle meydana gelen tabakalardan oluşur. Her bir karbon atomu kendisine komşu diğer üç karbon atomu ile güçlü kovalent bağları oluşturur. Dördüncü elektron ise bir diğer katmandaki karbon atomu ile zayıf Van der Waals bağı oluşturur. Bu zayıf bağlardan dolayı grafit yüzeyler birbirlerinden kolaylıkla ayrılabilir. Bu özellik de grafitte kaygan bir özellik kazandırır.



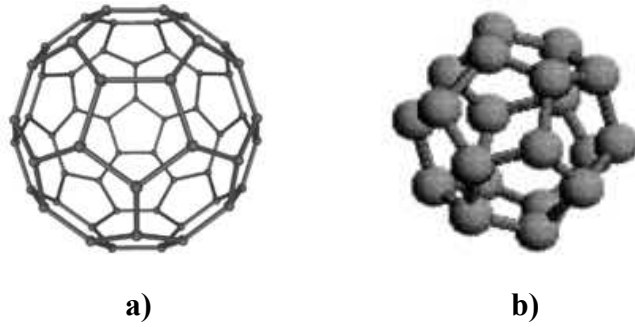
Şekil 2.2 Grafitin kristal yapısı

Grafitin elektriksel iletkenliği bu hegzagonal yüzeylerin birbirlerine paralel olarak kristal yönelimlerine bağlıdır. Dayanıklılık, yüksek sıcaklıkta kimyasal

dengeinin iyi olması, yüksek ısı iletkenliği, düşük ısıl genişleme katsayısı, ısıdan kaynaklanan şoklara karşı yüksek direnç, yüksek gaz adsorpsiyonu grafitin diğerk özellikleridir. Grafit genellikle elektrik fırınlarında ısıtıcı görevi görür. Ark oluşumu için kaynak elektrot kullanılır. Buna ek olarak hava temizleme cihazları, kimyasal reaktörler, bataryalar diğerk kullanım alanlarıdır [10].

2.1.3. Fulleren

Fullerenler henüz 1985 yılında keşfedilmiş oldukça yeni maddelerdir. 60 karbon atomunu içi boş küre şeklini olarak dizilmesiyle oluşan yapılardır. C_{60} olarak gösterilir. Her bir karbon atomu altıgen ve beşgen şeklini almış karbon atomlarıyla bağ yapar.



Şekil 2.3 Fulleren yapısı **a)** C_{60} fullerene yapısı **b)** C_{20} fullerene yapısı

Şekil 2.3'de C_{20} ve C_{60} fullerenealarının kristal yapısı gösterilmektedir. En az karbon atomundan oluşan fullerene C_{20} dir 12 adet beşgen yüzeyden meydana gelir. C_{60} fullerenei 12 beşgen ve 20 altıgen gruplarından oluşur ve görünümü bir futbol topunu andırır. C_{60} molekülüne buckminsterfullene (buckyball) da denir [10].

2.1.4. Grafen

Karbon nanotüpler ve C_{60} molekülleri ilk sentezlendikleri yıllardan günümüze kadar katı hal fiziğini son derece aktif araştırma alanları arasına girmiştir. Bal peteği kristal yapısında, sp^2 melezleşmesi yapan grafitin, nanotübün ve C_{60} 'ın ana yapıtaşı olan grafen 2004 yılında sentezlenebilmiştir.

Grafen, grafit, karbon nanotüp ve fulori, karbon tabanlı bal peteği ağ örgülü, π - *elektron* sistemleri içerisinde değerlendirilirler. Elmas ise sp^3 melezleşmesi ve dört-yüzlü ağ örgüsü ile öncekilerden farklı bir kategoride değerlendirilir. Grafen iki boyutlu planar yapıların çok ender örneklerinden birisidir. Karbon atomları 1-s ve 2-p orbitallerinin birleşimi ile 120 derece açılı sp^2 melezleşmesi yapar.

Grafen yapısında karbon-karbon bağ uzaklığı yaklaşık olarak 14,2 nm'dir. Grafen tabakalarının üst üste gelmesi ile meydana gelen grafitte iki grafen tabakası arasındaki mesafe ise yaklaşık olarak 33,5 nm'dir. Grafendeki güçlü karbon bağları ona yeryüzündeki bilinen en sağlam malzeme özelliğini kazandırmıştır. Bununla birlikte grafitteki grafen katmanlar arasındaki bağlar oldukça zayıftır. Kurşun kalemi kağıda sürtünce bu zayıf bağlar kırılmakta ve kağıda yayılan grafen ve grafit tabakalar yazı izlerini oluşturmaktadır.

2004 yılında bilim adamları iki boyutlu grafen kristallerini ayırmışlardır. Andre Geim, Kostya Novoselov ve proje arkadaşları sıradan bir yapışkan selobantı grafit üzerine tekrar tekrar yapıştırıp kaldırarak tekil grafen katmanını elde etmişler ve izole ettikleri grafen katmanını basit bir optik mikroskop ile gözlemişlerdir.

Grafit tabakası bir yüzey üzerine kaydırılarak grafen katmanlarının ayrışması sağlanır. Grafitin selobant ile katmanlarını ayrıştırılması da bu metod içerisinde değerlendirilebilir. Grafenin ilk kez sentezlenmesi bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 100 mikrometre büyüklükte grafen parçacıkları bu metodla sentezlenebilmektedir. Bir başka büyütme yöntemi ise, epitaxial büyütme yöntemi ile dir. Bir substrat üzerinde grafen büyütülmesidir. Grafenin büyütüldüğü substrat grafen ile etkileşebilmektedir.

Grafen, transistörlerde, pil teknolojisinde, sensör yapında ve hidrojen depolamada kullanılmaktadır.[11]

2.2. Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüpler karbon moleküllerinin silindir biçimde dizilmiş halleridir. Bucky topu olarak da bilinirler ve nanoteknolojide, elektronikte, optikte ve diğer malzeme bilimlerinde pek çok kullanım alanları vardır. Oldukça güçlü mekanik özellikleri, göze çarpan elektriksel özellikleri ve ısı iletkenlikleri nedeni ile akademik alanda oldukça önem kazanmışlardır [12].

Karbon nanotüpleri 1991 yılında Nec çalışanı Sumio Iijima tarafından ark buharlaştırma tekniği ile fullerenlerin sentezinde katot üzerinde biriken maddeler üzerinde çalışırken ilk defa keşfedilmiştir. Bu sentezde argon ortamında iki karbon elektrotu üzerine yüksek bir akım uygulanmaktadır. Iijima, katodik kalıntının merkez çekirdeğinde nanoparçacıklar ve nanotüpler halinde kapalı grafit yapıların olduğunu bulmuştur. Kısa bir süre sonra, Iijima'nın laboratuvarında farklı ark buharlaştırma şartlarında nanotüplerin büyük miktarlarda nasıl üretileceğini göstermiştir [13].

Nanotüpler yapısal olarak aynı bucky topları gibi fulleren grubundandır. Tek farkları nanotüplerde karbon atomları küresel değil silindirik biçimde dizilmişlerdir. Yani bucky toplarda karbon atomları futbol topu şeklinde dizilmişken nanotüplerde silindir şeklinde dizilmişlerdir. Nanotüplerin en azından bir ucunu yarım küre şeklinde fulleren kapatmıştır. Temel olarak tek duvarlı karbon nanotüpler (single-walled carbon nanotubes- SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (Multi walled carbon nanotubes- MWCNT) olmak üzere iki çeşittir. Nanotüplerin çapları sadece birkaç nanometre olduğu için (insan saçının yaklaşık 50.000'de biri) çaplarının büyüklüklerine göre sınıflandırılırlar. Tek duvarlı karbon nanotüpler tek bir grafit yüzeyinin yuvarlanarak silindir şeklini almasıyla oluşur. Çok duvarlı karbon nanotüpler ise bu silindirlerin iç içe sıralanmasıyla oluşur [12].

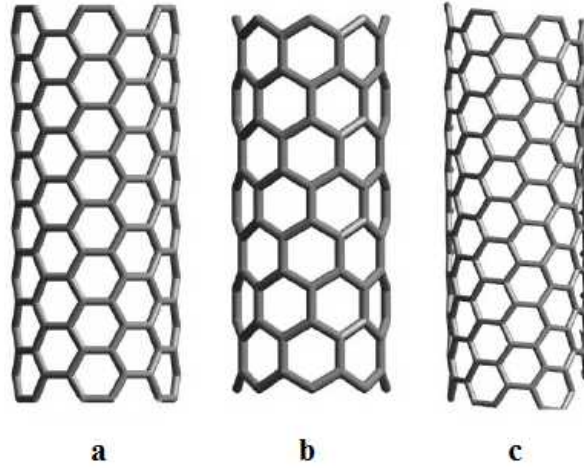
2.2.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler (Single Walled Carbon Nanotubes-SWCNT)

Tek duvarlı karbon nanotüpler bir grafit yüzeyinin bir eksene göre simetrik biçimde yuvarlanarak silindir şeklini alması ile oluşur ve tek boyutludur. Bu eksene göre spiral dağılımlarına **kiralite** denir. Kiral vektörü nanotüpün etrafında döndüğü eksen üzerindeki birim vektördür. Tek duvarlı karbon nanotüpleri sınıflandırırken bu kiral vektöründen (Ch) yararlanılır [14].

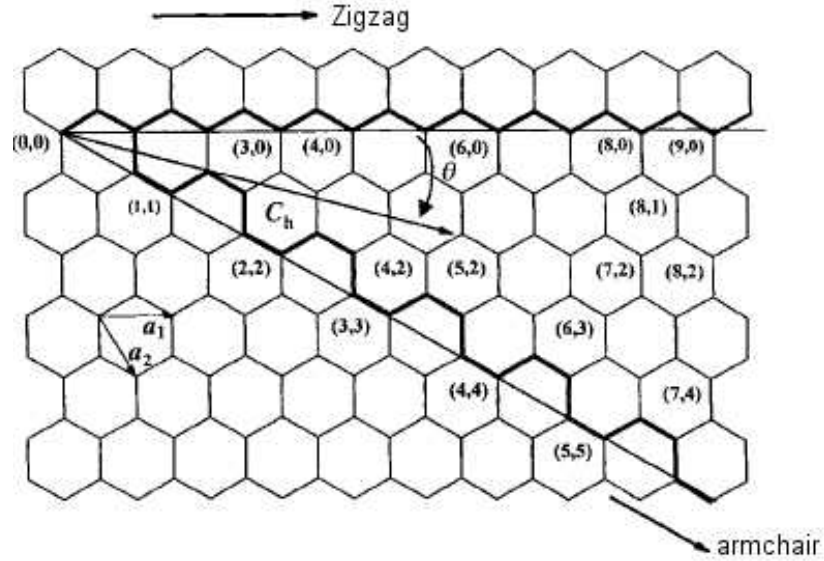
Karbon nanotüplerin moleküler yapıları yüksek çözünürlüklü mikroskop teknikleri ile belirlenir. Silindirik yapı hegzagonal bir örgü ile grafit yüzeyi oluşturur.

Bu grafit yüzeyin ne şekilde dödürüldüğüne bağlı olarak nanotüpler üç çeşit yapıda sınıflandırılabilir. Bunlar; zigzag, kiriş ve kiral nanotüplerdir [15].

Şekil 2.4' de her üç nanotüp gösterilmektedir. Nanotüplerin uçlarında yarım küre şeklinde florinler bulunmaktadır. İlk olarak nanotüpleri simetrik ve asimetric olarak ikiye ayırabiliriz. Bu şekilde bir ayrımı düşünürsek asimetric nanotüplerin ayna görüntüleri kendi görüntüleriyle aynıdır. Simetrik nanotüplerde ise spiral bir dizilim olacağı için ayna görüntüleri kendi görüntülerinden farklıdır. Kiriş (koltuk) ve zigzag nanotüpler asimetric, kiral nanotüpler ise simetrik nanotüplerdir.



Şekil 2.4 Karbon nanotüplerin sınıflandırılması. (a) kiriş (koltuk), (b) zigzag, (c) kiral Nanotüpler bir grafit bir yüzeyin yuvarlanarak silindir şeklini almasıyla oluşur. Uçlarında da yarım küre şeklinde fullerene bulunur. Görüntüleri altıgen birim hücrelerin oluşturduğu bal peteği şeklindedir.[14]



Şekil 2.5 Tek duvarlı karbon nanotüplerin grafen yüzeyi.

Değişik biçimlerdeki nanotüpler kolayca birim hücrelerine göre belirlenir, birim hücreleri kristal yapıyı belirleyen en küçük atom grubudur. **Şekil 2.5'**de görüldüğü gibi nanotübün kiriş vektörü C_h , $\hat{a}_1$ ve $\hat{a}_2$ bal peteği de diyebileceğimiz hekzagonal örgüde birim vektörler olmak üzere (n ve m tamsayı) $C_h = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$ şeklinde yazılır. Başka bir önemli parametre olan kiriş açısı; C_h ile $\hat{a}_1$ arasındaki açıdır. Grafit levha nanotübün silindirik kısmını oluşturmak üzere rulo yapıldığında, kiriş vektörlerinin sonları çakışır yani kiriş vektörü, nanotübün yüzey çemberini oluşturur. m ve n 'in değişik değerleri farklı nanotüp yapılarına sebep olur. Kiriş nanotübü $n=m$ ve kiriş açısı 30° olduğunda, “zigzag” ise $n=0$ ya da $m=0$ ve kiriş açısı 0° olduğunda oluşur. Kiriş açıları 0° ile 30° arasında değişen nanotüpler ise kiral nanotüp olarak adlandırılır.

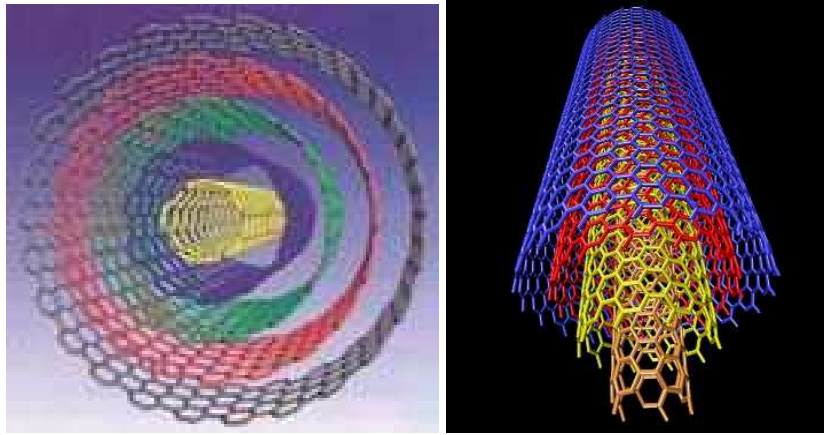
Nanotüplerin özelliklerini belirleyen çap d_t , kiriş vektörünün uzunluğunun $1/4$ 'ü dür. Böylelikle, acc düzlemde en yakın karbon atomu ile uzaklık olmak üzere; $d_t = (3/\pi)acc(m^2 + mn + n^2)^{1/2}$ ve kiriş açısı da $\tan^{-1} \sqrt{3}n/(2m+n)$ 'dir.

Nanotüplerin çaplarının ve kiriş açılarının ölçümü taramalı tünelleme mikroskobu ve geçirmeli elektron mikroskobu ile yapılmaktadır. Yine de çapı ve θ açısını ölçerken aynı anda örneğin direnç gibi fiziksel bir özelliğide ölçebilmek halen büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Çünkü nanotüplerin boyutları çok küçük ve

karbon atomları sürekli bir ısısal hareket halindedirler. Ayrıca mikroskoptan gönderilen elektron demeti nanotüplere zarar verebilirler. Her nanotüp birim hücresi 2'şer atom içeren altıgenlerden oluştuğuna göre, nanotüp birim hücresi birçok karbon atomu içerir. Nanotüp birim hücresi altıgenden N kere büyük ise, ters uzayda birim hücre altıgenden $1/N$ oranında küçüktür.[15]

2.2.2 Çok Duvarlı Karbon Nanotüpleri (Multi-walled Carbon Nanotubes-MWCNT)

Çok duvarlı karbon nanotüpleri iç içe geçmiş karbon silindirlerinden oluşur. (Şekil 2.6.) Çok duvarlı karbon nanotüpleri için yapılan hesaplamalara göre içte (5,5) kiriş nanotüpü, dışta ise (10,10) kiriş nanotüpü şeklinde oluşan nanotüpler en uygun nanotüplerdir. Çapları arasındaki boşluk 34 nm'dir ve aralarında 48meV'luk bir enerji farkı vardır. Büyük çaplı çok duvarlı karbon nanotüplerin grafitle aynı özelliklere sahip olması beklenir. Çap büyüklüğü 10-20 nm'den büyük ve hegzagonal yapıdadır. [14]



Şekil 2.6 Çok Duvarlı Karbon Nanotüpleri

2.2.3 Karbon Nanotüplerin Elektriksel Özellikleri

Bir tek grafit levhası yarı iletkenidir. Bunun anlamı sahip olduğu özellikleri yarıiletken ile metal arasında orta düzeyde olmasıdır. Grafit levha yuvarlanarak nanotüp oluşturulduğunda; daire çevresinde yalnızca karbon atomları sıralanmaz, aynı zamanda elektronların kuantum mekaniksel dalga fonksiyonları da uyumlu olarak düzenlenir. Radyal doğrultularda, elektronlar inceltirilmiş tek katmanlı grafit

düzlem tarafından sınırlanmıştır. Nanotübün daire çevresinde periyodik sınır şartları ortaya çıkmaktadır. Örneğin eğer bir nanotüp daire çevresinde 10 hegzagon bulunduruyorsa, 11. hegzagonal 1. ile çakışmaktadır. Silindir etrafında 2π 'lik faz farkı ile karşılaşılır.

Kuantum sınırlarından dolayı elektronlar sadece nanotüp eksenı boyunca etkili olmaktadır, böylece dalga vektörleri de bu doğrultuda işaretlenir. Bu basit düşünce tek boyutlu bandın dağınım bağıntısını hesaplamakta kullanılır. Bu da çok iyi bilinen grafit levhası üzerinden, dalga vektörünü enerjiye bağlar. Noriaki Hamada ve meslektaşları ve daha sonra NEC Laboratuvarından (Tsukuba) küçük çaplı nanotüpler için dağınım bağıntısını hesaplamışlardır. Bu da gösteriyor ki küçük çaplı nanotüplerin 1/3'ü metalik, geri kalanı ise çaplarına ve kiriş açlarına bağılı olarak yarıiletkenlerdir. Genel olarak (n,m) bir karbon nanotüp $n-m=3q$ (q tam sayı) olmak şartıyla metaliktir. Bütün kiriş nanotüpler metaliktir, zigzag nanotüplerin 1/3'ü de metaliktir [16].

Berkeley Üniversitesi'nde yapılan bir araştırmada birbirine küçük farklarla benzemeyen iki nanotüp molekülü uç uca birleştirildiğinde, birleşme noktası diyot olarak bir elektrik devresi gibi işlev gördüğü bulunmuştur. Diyotlar devrelerde genellikle alternatif akımı, doğru akıma çevirmekte kullanılır ve doğrultucuların temelini oluşturur. Bir diğer araştırma da transistörlerle ilgilidir. Transistörler tamamlanmış devrelerin temel yapı bloklarıdır. Gelecekte nanotüplerin devrelerde kullanılmasıyla, bunlarla transistörlerin yapılıyor olması kaçınılmaz olacaktır. Bağımsız çok duvarlı ve tek duvarlı nanotüpler kullanılarak başarıyla üretilen nanotüp transistörleri, "Alan Etkili Transistör Kanalları" (AET) gibidir.

Elektriksel özelliklerin nanotübün çapına ve kiriş acısına son derece bağılı olduğunu daha önce vurgulamıştık. Bundan dolayı teorik tahminlerin doğruluğunu test etmek için yapılan deneyler güçlükle gerçekleştirilmiştir. Yapılar üstünde elektronik ve optik nano ölçekte ölçümler yapmanın zorluklarının yanı sıra, nanotübün simetrisi ile ilgili bilgilerin (n ve m değerleri) tahminini yapmakta oldukça önemlidir. Bu zorluklara rağmen deneysel çalışmaların öncülüğünde, nanotüplerin elektriksel özellikleri hakkında temel teorik tahminler doğrulanmıştır. Yüksek kaliteli tek duvarlı nanotüplerin yeterli miktarlarda elde edilebilmesinden

önce deneyler çok duvarlı nanotüpler üzerinde odaklanmıştı. Bunun yanında başlarda çok duvarlı nanotüpler üzerinde yapılan ölçümlerde, tek boyutlu kuantum etkisi ölçülememiştir. Çünkü nanotübün çapı çok geniş kalmış ya da çalışmalar yeterli düşük sıcaklıklarda yapılmamıştı. Fakat çok-katmanlı nanotüplerden alınan sonuçlar, farklı çap ve kirişlerdeki yoğunlaşmış nanotüplerden alınan eşzamanlı bilgiler ile tamamlanmaktadır. Ek olarak, nanotüpteki kusurlar elektron seyrekliğine yol açabilir ve nanotübün tüm ögelerinde elektrik iletimi güvenilir olmayabilir. Elektriksel kontakların iletim özellikleri elektron iletimini etkileyebilir. Ayrıca bu ilgi çekici iletim olayı, tek boyutta kuantum etkisinin görülebildiği düşük sıcaklıklarda ve küçük çaplı çok-katmanlı nanotüpler üzerinde yapılmalıdır.

General Motors Araştırma Laboratuvarından Charles Oik ve Joseph Heremans'ın (Michigan) taramalı tünelleme mikroskopuyla (STM), bağımsız çok katmanlı nanotüplerin özelliklerini 1994'te ölçmesiyle, çok önemli bir aşama kaydedildi. Bu sonuçlar ilk defa bazı nanotüplerin metalik, bazılarının yarıiletken olduğunu gösterdi. Ayrıca Oik ve Heremans yarıiletken nanotüplerin bant aralığının teorik sonuçlarla uyumlu olarak $1/dt$ ile orantılı olduğunu gösterdiler. Bunun yanı sıra, STM örneklerinin nispeten kısa uzaysal diziliş olduğundan, bu tür teknikler çok-katmanlı nanotüplerin dış kabukları için çok hassastır. Tek-katmanlı nanotüpe bir elektron eklemek için gerekli enerjide ölçülmüştür. 3 μm uzunluğunda ve 1nm çapında nanotüplerde elektronlar arasındaki Coulomb itmesini yenebilmek için 2.6 meV'lik enerjiye ihtiyaç vardır [15].

2.2.4 Karbon Nanotüplerin Mekanik Özellikleri

Başka bir heyecan verici araştırma alanı ise karbon nanotüplerin mekaniksel özellikleridir. Grafit ve karbon fiberlerine benzer olarak, nanotüplerin çok sağlam ve yüksek elastikiyet modülüne sahip olmaları beklenmektedir. Ayrıca tek-katmanlı karbon nanotüplerin, tıpkı uzay teknolojisi uygulamalarında kullanılan karbon fiberi gibi, çok sağlam ve esneme altında kırılmama dayanıklılığına sahip olması beklenmektedir.

North Caroline Üniversitesinden Jerzy Bernhole ve meslektaşlarının hesaplarına göre bir nanotüp kırılmadan yüksek oranda uzayabiliyor. Karbon fiberlerinin aksine, tek katmanlı nanotüpler dikkate değer oranda esnektir. Burkulabilir, düzleştirilebilir, küçük daireler şeklinde kıvrılabilir. Ya da başka çeşitli esnetmeler sonucunda kırılmadan kalabilir. Dahası Bernhole ve meslektaşları, nanotüp üzerindeki etki çekildiği zaman eski orijinal şeklini aldığını gözlemlemişlerdir. Baskı altında kolayca kırılan karbon fiberlerinin aksine, karbon nanotüpler etki uygulandığında elastikiyeti sağlayan tek benzer yapıyı oluştururlar. Sonuç olarak nanotüpler sadece karbon fiberlerinin avantajlarına sahip olmayıp, aynı zamanda çok daha esnek ve basınç altında kırılmaya dayanıklıdır. Bu özellikler tek başlarına ya da diğer özellikleriyle birleştirilerek kullanılabilir. Örneğin; Hyperion Catalysis International Company bu moleküllerden az miktarda plastiğe katarak, plastiği elektriksel olarak iletken hale getiriyor. İletken plastikler otomotiv sektöründe elektriksel olarak yüklü boya imal etmek üzere kullanılıyor. Bu elektrostatik boya, spreyci boya yöntemine göre daha fazla boya tasarrufu sağlamaktadır. Düz ip şeklindeki nanotüpleri halka nanotüplere çevirmek için bir yol bulunmuştur, bu halkalar birçok katman olarak, tek-katmanlı nanotüplerden oluşuyor ve 0,7 mikron çapa sahip. Halka haline getirme, proteinlerde ve diğer biyomoleküllerde gözlenmiş ve sarım içi temel kuvvetin hidrojen bağından kaynaklandığı düşünülmekteydi. Karbon nanotüpler ise yeni bir özellik göstererek halka olayında sadece Van der Waals kuvvetlerinin etkili olduğu görülmüştür. Metal elektrodalara yerleştirdiğimiz halkalar, yeni elektrik iletim olayını incelememizi sağlar. Halka oluşturmak için kullanılan nanotüpler son derece küçüktür; çapları sadece 1,4 nm'dir. Bu nanotüpler düşük sıcaklıklarda tek boyutlu iletkenlerdir, kuantumsal etkileşim tüpler arasındaki elektriksel iletimi yönetir. Halka şekli, bunun gibi tek boyutlu iletkenlerde kuantum etkilerini gözleyebilmemizi mümkün kılar [15,16].

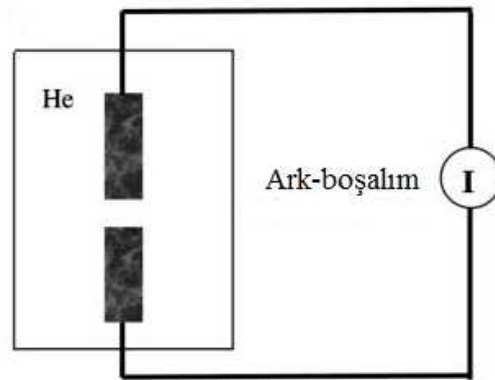
2.3. Karbon Nanotüplerin Sentezleme Yöntemleri

Karbon nanotüpleri genel olarak ark boşalım (arc discharge), lazer aşındırma ve karbon buhar birikimi olmak üzere üç ayrı metotla üretilmektedir. Nanotüp yapısının oluşumuna ait yollar detaylı olarak bilinmemekle birlikte nanotüp yapısının

oluşumunda birden çok mekanizmanın rol aldığı düşünülmektedir. Üç basamaklı bir mekanizmaya göre nanotüplerin ve fullerenlerin oluşumunda metal katalizör parçacığı üzerinde öncelikle bir başlatıcı bir C_2 yapısı oluşur. Bu yarı kararlı karbür parçacığından hızla çubuğa benzer bir yapı oluşurken grafit özelliğinde duvarlar yavaşça meydana çıkar. Bu mekanizma elektron mikroskobu görüntüleri ile açığa çıkarılmıştır [17]. Farklı üretim tekniklerinde kullanılmakta olan farklı atmosferik şartlara göre küçük değişiklikler olmasına rağmen genel olarak her üç teknikte de karbon nanotüp yapısının oluşum şekli benzerdir [18].

2.3.1 Ark Boşalım (Arc Discharge) Tekniği

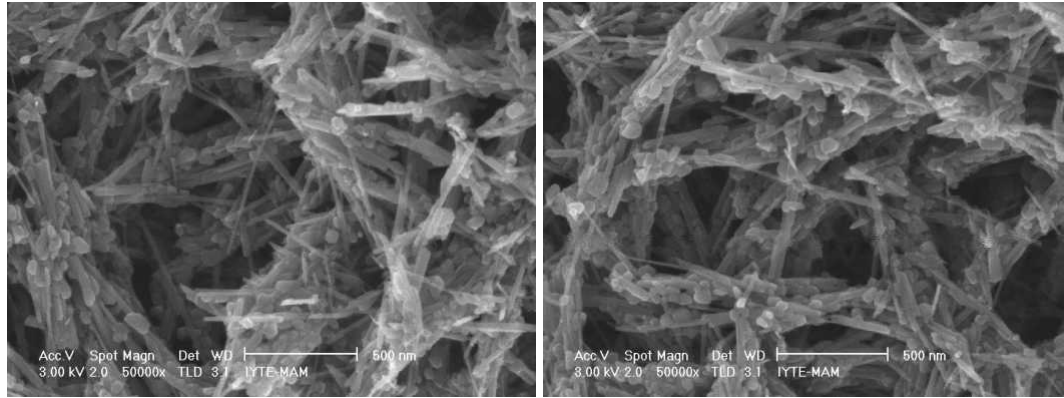
Ark buharlaşma tekniği, ilk keşfedilen, laboratuvar imkanlarında kolayca yapılabilecek ve en geniş kullanım alanı bulan metot olmasına rağmen, diğer metotlarla karşılaştırıldığında bu metotta daha az saflıkta yapılar oluşur ve ürün nanotüplerden Fe, Ni, Co gibi katalitik metallerin ayrılmasını gerektirir. Bu metotta C_{60} üretim yönteminden farklı olarak soygaz (helyum, argon vb) ortamında grafit elektrotları yüksek arklama (örneğin 20V, 50-100 A) sırasında temas halde değil birbirine değmeyecek kadar yakın (yaklaşık 1 mm) tutulur. **Şekil 2.7'** de Ark boşalım yönteminin sistematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.7 Ark Boşalım

Katalizör olarak metal parçacıkları (ağırlıkça % 1) eklenebilir. Uygulanan akım iki elektrot arasında yüksek sıcaklıkta bir akışa yol açarak anottan buharlaşan karbonun bir kısmının katotta silindirik olarak tekrar yoğunlaştırır. Bu silindirik

tortunun merkezinde hem nanotüpler hem de nanoparçacıklar oluşur. Yüksek verimde nanotüplerin oluşumu plazma akımının düzenliliğine ve karbon elektrotundaki birikimin sıcaklığına bağlıdır [13]. Argon ve helyum gazı ortamında üretilen tek duvarlı karbon nanotüplerinde çapların değiştiği gözlenmiştir. Ortamı oluşturan argon-helyum gazlarının termal iletkenlik ve yayınlılık katsayıları, gazların bağıl konsantrasyonu ile etkilenmekte; ısı transfer, kütle yayınlılığı, sıcaklık ve ortamdaki karbon-metal parçacıklarının yoğunlukları ile nanotüplerin çapları belirlenebilmektedir [13]. Bu metotta eğer anot metal katalizörleri (Fe, Co, Ni vb) ile katkılanırsa 1.2- 2.4 nm çapında tek duvarlı karbon nanotüpleri elde edilebilir. Eğer her iki elektrot da grafit ise ürünün MWCNT olması beklenir. Ancak bu metotta fullerenler, amorf karbon ve grafit tabakaları gibi yan ürünler de gözlenir. **Şekil 2.8** 'de ark boşaltım yöntemi ile üretilen karbon nanotüplerin SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 2.8 Ark boşaltım yöntemi ile üretilen karbon nanofiberler. [19]

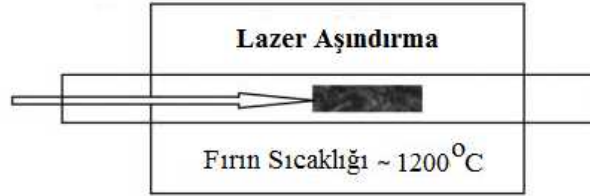
Nanofiberlerin etrafında amorf karbon ve grafit tabakaları görülmektedir.

2.3.2 Lazer Aşındırma (Laser Ablation) Tekniği

Bu teknikte farklı gaz atmosferlerinde, yüksek sıcaklık fırınında (1200°C) kuartz tüp içerisindeki grafit ve metal katalizör parçacıkları üzerine lazer sinyali gönderilir ve buharlaştırılır. Buharlaştırılan maddeler soğudukça küçük karbon molekülleri ve atomları daha büyük kümeler oluşturmak üzere yoğunlaşırken bu esnada katalizör daha yavaş yoğunlaşır.

Başka bir mekanizmada fulleren veya grafit tabakasına Ni veya Co katalizörleri ilâşerek fullerenin kapanmasını engeller ve tüplerin oluşumuna yol açar.

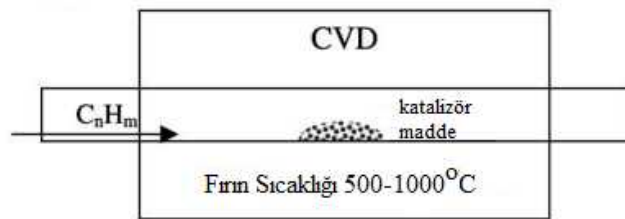
Lazer aşındırma yöntemi ile % 90'a varan saflıkta nanotüpler üretilebilir. Bu metotta da eğer saf grafit elektrotlar kullanılırsa MWCNT'ler, eğer Co, Ni, Fe, gibi katalizörler içeren grafit çubuklar kullanılırsa SWCNT'ler üretilmektedir. **Şekil 2.9'** da Lazer Aşındırma yönteminin sistematik görünümü verilmiştir [20].



Şekil 2.9 Lazer Aşındırma

2.3.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD) Teknigi

Bu metotta gaz fazında bir karbon ile gaz haldeki karbon molekülüne enerjinin geçmesi için bir enerji kaynağı (plazma veya dirençle ısıtılmış bir bobin) kullanılır. En çok kullanılan gaz kaynakları metan, etan, karbon monoksit ve asetilendir. Enerji kaynağı reaksiyona girecek atomik karbonu oluşturmak amacı ile kullanılır. İki asamadan oluşan bu yöntemde öncelikle katalizör yüzeyi hazırlanır. Gaz fazındaki karbon Ni, Fe veya Co gibi bir katalizörle kaplanmış ve ısıtılmış olan alttaşa doğru hareket eder. İkinci aşamada nanotüpler kimyasal olarak (genellikle amonyak ile) veya ısıl tavlama ile aşındırılmış yüzeyde kümeler oluşturarak elde edilir. Karbon nanotüplerinin mükemmel dizilisi CVD metodu ile nano boyutta kontrol edilebilir. Karbon nanotüpleri bu metotta 650-900°C sıcaklıkta sentezlenir. **Şekil 2.10'** da Kimyasal Buhar Biriktirme yönteminin sistematik görünümü verilmiştir [21,22].



Şekil 2.10. CVD sistemi

Karbon buharı birikimi yönteminde nanotüplerin oluşumu daha yavaş olmasına rağmen tek duvarlı veya çok duvarlı karbon nanotüplerinin üretiminde

seçici özellikler gösterir. Besleme gazı yüksek kararlılığından dolayı düşük sıcaklıklarda bozunmamasına rağmen katalizör yüzeyinde bozunur ve katalizörün nano parçacıkları üzerinde toplanarak farklı özellikte nanotüpleri oluşturur.

CVD metodunun avantajları daha büyük miktarlarda ürün elde edilebilirken daha düşük sıcaklıklarda çalışılması, düzgün bağlı karbon nanotüpleri elde edilebilmesidir. Katalizör seçimi yapılarak karbon nanotüplerinin büyümesi ve tasarımı kontrol edilebilir. Fakat bu avantajlarının yanında katalizörler safsızlık olarak nanotüplerde kalabilmekte nanotüp kusurları gözlenmektedir.

2.4 Karbon Nanotüplerin Gaz Algılama Özellikleri

Karbon nanotüplerin elektronikte pek çok uygulama alanları vardır. Bu uygulama alanlarında biri de gaz sensörleridir. Yüksek duyarlılığa sahip karbon nanotüplerden yapılan gaz sensörleri pek çok alanda özellikle de çevre koşullarının denetlenmesinde ve çevre kirliliğinin ölçümünde kullanılabilir. Gaz adsorpsiyon özelliği, oldukça geniş yüzey alanı, yüksek duyarlılığa sahip olmaları ve kimyasal etkileşim özelliklerinden dolayı karbon nanotüpler gaz ölçümleri için oldukça önemlidir. Karbon nanotüplerden yapılan gaz sensörleri özellikle yarı iletkenlerden elde edilir. Genellikle elektriksel iletkenlikleri yüzeye adsorbe edilen gaz molekülleri ve nanotüp yüzeyi ile elektron transferi sonucu değişiklik gösterir. Yarı iletken yüzeyinde oluşmuş karbon nanotüplerin adsorbe ettiği gaz molekülleri miktarı ile nanotübün elektriksel direncinde artış göstermektedir. Karbon nanotüplerin gaz sensörlerinde kullanımı konusunda için özellikle tek duvarlı karbon nanotüpler önem taşır. Çeşitli işlemlere tabi tutularak karbon nanotüp sensörlerini duyarlılıklarını arttırmak mümkündür. Bunlardan biri de yüzeyin nano boyutunda kaplama işlemleridir. Gaz sensörleri için bu yöntem ekonomik olduğu gibi duyarlılığın performansını artırıcı nitelik kazandırır. Platin, altın veya gümüş kaplama işlemleri ile sensörlerin duyarlılıkları ve seçicilikleri artmıştır. Bu şekilde kaplanan nanotüpler özellikle NO₂ gazını algılamada önem taşır [23].

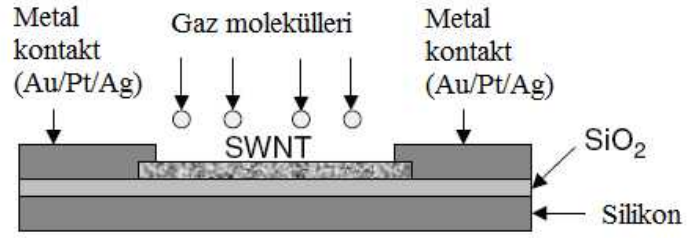
Alan Etkili Transistörler (AET) in yapısı, Si ile SiO₂ arasında çok temiz bir arayüz olmasında dayandığı için yarı iletken teknolojisi için önemlidir. Temelde, alan etkili transistörler iletken, yalıtkan ve yarı iletken oluşan bir sığa yapısına sahiptirler. İletken ile yarı iletken arasındaki gerilim değiştirilerek, yalıtkanın hemen

altındaki yarı iletken bölgesindeki yük taşıyıcılarının işareti ve yoğunluğu değiştirilebilir. Yarı iletken malzemedeki yük taşıyıcıların yoğunluğunun değişmesiyle, iletkenliği de değişir. İki terminal (kaynak ve savak) eklenerek, iletkenlikteki bu modülasyon kullanılarak bu terminaller arasındaki akım, üçüncü bir terminalle (kapı) kontrol edilebilir. Kapı terminali iletkene bağlıyken, kaynak ve savak terminalleri birer eklemlerle gerçekleştirilirler.

Herhangi bir ortamdaki kimyasal özelliklerin değişiminin bir elektronik cihazın elektriksel özelliklerindeki değişimine yansımalarının keşfinden sonra tek duvarlı karbon nanotüpler alan etkili transistörler olarak kullanılmaya başlamıştır. Özellikle azot ve amonyak algılamada kullanılırlar

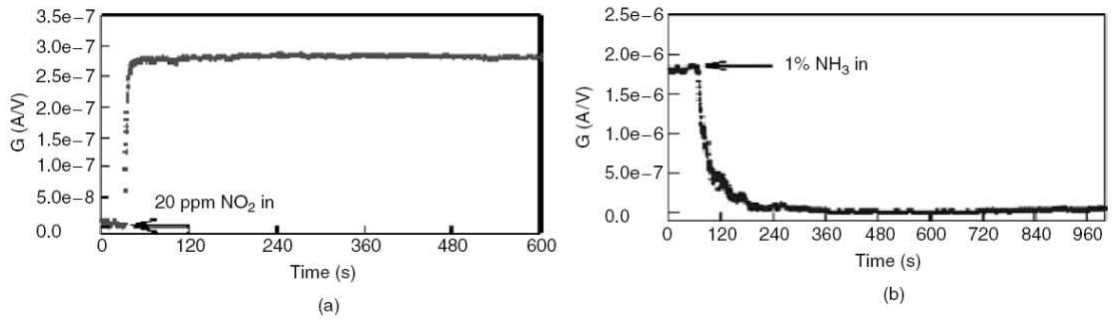
Kimyasal sensörler herhangi bir ortamdaki gaz konsantrasyonunu ölçebilir ve bu durumda çevre kirliliği de kontrol altına alınabilir. Endüstriyel alanda küçük boyutlu, düşük enerji ile çalışabilen, hızlı ve duyarlı sensörlerin üretimi önem taşır. Fakat bu alanda duyarlılığı arttırmak için yüksek bir talep vardır. Karbon nanotüplerin gaz algılama duyarlı olmaları herhangi bir tehlikenin güven altında tutulmasını sağlar. Bunun yanında herhangi bir kimyasal özelliğin değişimini gözlemleyebilirler ve kimyasal direnç olarak kullanılabilirler. Ayrıca nanotüp yüzeyine adsorbe olan gaz molekülleri sayesinde iletkenliklerindeki değişim gözlemlenerek alan etkili transistörler olarak kullanılabilirler.

Karbon nanotüplerden yapılan AET' lerde karbon nanotüpler kaynak ve savak terminalleri arasında kontak kanalı görevindedir. Kapı terminali polisilikon bir maddeden yapılmıştır. Kaynak ve savak terminalleri ise gümüş, altın ya da platin gibi iletkenlerdir. Yarı iletkenin band aralığı tüpün çapı ile bağlantılıdır. $E_g \sim 1/d$ dir. ($d \sim 1.4$ nm için $E_g \sim 0.5$ eV'tur). Tek duvarlı karbon nanotüpler iki metal elektrotla bağlanmıştır. Oluşan bu metal / SWCNT / metal sistemi p tipi transistör karakterindedir. **Şekil 2.11**'de karbon nanotüplerden yapılmış transistör ün sistematik görünümü verilmiştir[24].



Şekil 2.11 CNT transistör

Gaz ölçümü için tasarlanmış bu cihaz gaz ölçümü deneylerinde kullanılabilir. NO_2 veya NH_3 gazı dakikada 500 ml ve temizleme gazı olarak da argon gazı dakikada 700 ml verildiğinde karbon nanotüplerin dirençlerindeki değişim gözlemlenebilir. Tek duvarlı karbon nanotüplerin iletkenlikleri NO_2 konsantrasyonu ile artar NH_3 konsantrasyonu ile azalır. **Şekil 2.12**'de bu değişim verilmiştir [24].



Şekil 2.12. Karbon nanotüplerin gaz algılama grafiği.

NO_2 molekülün kimyasal yapısı ve paylaşılmamış tek bir elektronu nedeni ile bilinen en güçlü oksit maddedir. Karbon nanotüpten NO_2 gazına yük transferi sırasında karbon nanotüplerdeki boşlukların sayısında bir çoğalma oluşur ve bu durum akımın artmasına neden olur. Diğer taraftan NH_3 molekülü serbest elektronu sayesinde nanotüp yüzeyindeki diğer kimyasallardan etkilenir ve diğer kimyasallara elektron verir. Bu nedenle nanotüp üzerinden geçen akım azalır [24].

3. DENEYSEL YÖNTEM

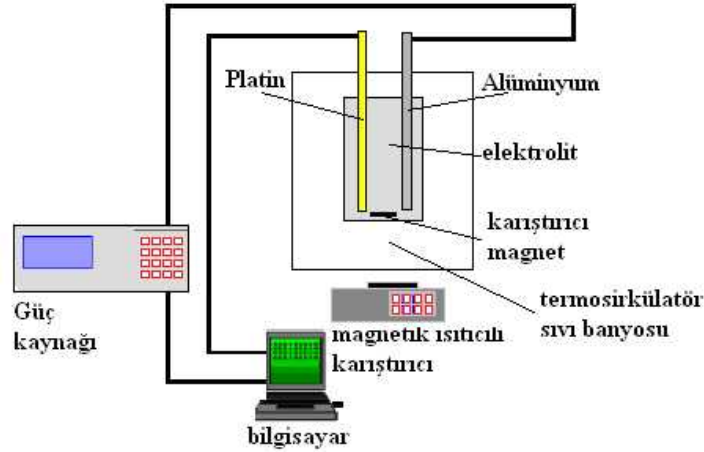
3.1 Karbon Nanotüplerin Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi İle Üretilmesi

Çalışmanın bu kısmında karbon nanotüpler bir buçuk metre boyunda kuartz bir fırın içerisinde ve üretilmiştir. Karbon nanotüplerin oluşması için kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılmıştır. 600°C ve 700°C arasında değişen sıcaklık ortamında karbon nanotüpler kobalt katalizör kaplı Si / SiO_2 ve Si / alümina alttaşları üzerinde büyütülmüştür. Si / alümina ince filmlerin hazırlanması için gerekli kaplama işlemler vakumlu bir kaplama sisteminde buharlaştırma (evaporation) yöntemi kullanılarak Al ince filmler oluşturulmuştur. Katalizör büyütme işlemleri için Spin Kaplama ve Radyo Frekansı püskürtme sistemlerinden yararlanılmıştır.

3.1.1 Si/ Alümina Alttaşlarının Hazırlanışı

Si tabanlı alümina ince film hazırlamak için öncelikle 65 mikron oksit tabakası olan (100) yönelimli n-tipi silisyum yarıiletken kristal, kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Bunun için kristal, sırasıyla yüksek saflıktaki aseton, metanol, HF ve izopropil alkol çözeltilerinde, her bir çözeltide 1 dk. süresince bekletilmek şartıyla yıkanmıştır. Her bir yıkama aşamasından sonra kristaller deiyonize su ile yıkanıp, son yıkamadan sonra yine deiyonize su ile yıkanıp, yüksek saflıktaki azot gazı ile kurutulmuştur.

Temizleme aşamasından sonra kristallerin yüzeyine buharlaştırma yöntemiyle Alüminyum film kaplamak için kristaller Leybold Univax vakumlu kaplama sistemine yerleştirilmiştir. Ardından, vakumlu kaplama sistemine Tungsten pota yerleştirilip potaya saf alüminyum parçaları konulduktan sonra 10^{-6} mbar vakumda, tungsten potaya akım uygulayarak ısı buharlaştırma yöntemiyle Silisyum yüzeyine saf Al film kaplanmıştır.



Şekil 3.1. Anodizasyon sistemi

Alüminyum filmin Silisyum yüzeyine kaplanması hemen sonrasında, Alüminyum atomlarının alüminyum içinde düzgün ve homojen dağılımını sağlamak amacıyla örnekler 450°C sıcaklıkta 30 dk. süresince tavlansmıştır. Tavlama işleminden sonra elmas kesici yardımıyla kristal 1×1 cm boyutlarında dilimlenip, deiyonize su ile yıkanıp, yüksek saflıktaki azot gazı ile kurutulup bir sonraki işleme kadar vakumlu desikatörde muhafaza edilmiştir.

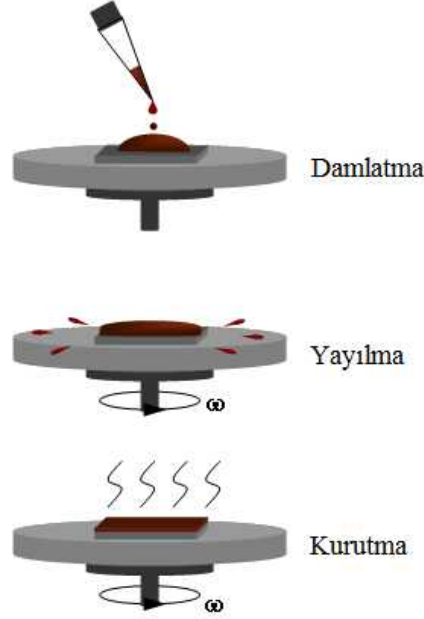
Al/Si örneklerin yüzeyinde anodik oksit oluşturmak için örnekler, güç kaynağı kullanılarak 0°C sabit sıcaklıktaki 0,3M Oksalik asit elektrolitinde $V=40\text{V}$ sabit gerilim altında belli bir süre boyunca anodizasyon işlemine tabi tutulmuşlardır. **Şekil 3.1**'de kullanılan anodizasyon sisteminin sistematik görünümü verilmiştir

3.1.2 Si/Alimuna İnce Filmlerin Kobalt Katalizörle Kaplanması

Si/ Alimuna ince filmlerin üzerleri spin kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Spin kaplama yöntemi son on yıldır katı yüzeyler üzerine polimer kaplamada ve özellikle de mikro elektronik cihazların üretiminde photoresist depolamada en çok kullanılan tekniktir.

Dakikada binlerce dönüş yapan bir alt tabaka (alttaş) üzerine kaplama yapılmak istenen maddenin çözeltisi dökülür. Merkezci kuvvetin etkisi altında çözelti tüm alttaş üzerine düzgün şekilde yayılır. Dönme esnasında çözücünün uzaklaşmasıyla, yüzey kurur. Eğer ek olarak artan bir ısı verilirse ince film alttaş üzerinde oluşturulmuş olur ancak filmin oluşması için her durumda ısı vermek

gerekli değildir. **Şekil 3.2** 'de spin kaplama yönteminin sistematik görünümü verilmiştir



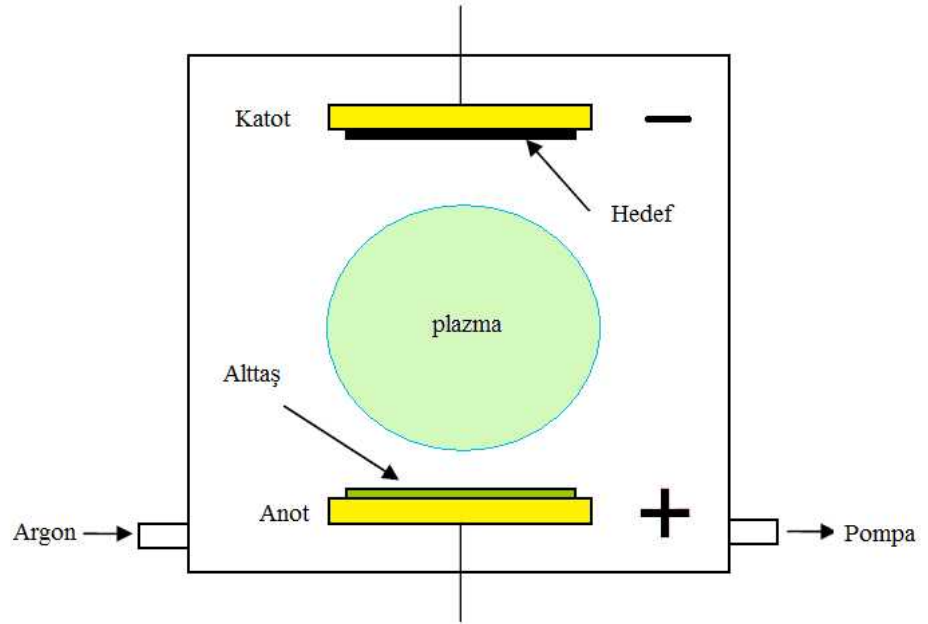
Şekil 3.2 Spin kaplama yöntemi [25]

Sistemde kaplamanın yapılacağı bölüm bir kapakla ortamdan yalıtılmıştır. Bu filmlerin tozdan arındırılmış bir alanda kaplanmasına izin vermektedir. Ön tarafta görülmekte olan kontrol paneli yardımıyla dönüş hızı veya süresini ayarlamak için komutlar verilebilmektedir. Sistem bilgisayar destekli olduğundan aynı işlemler bilgisayardan da yapılabilmektedir [25].

Bu çalışmada Si/ Alümina ince filmler üzerine spin kaplama tekniği için öncelikle bir çözelti hazırlanmıştır. 240 g/L $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 40 g/L HBO_3 ve 1 g/L askorbik asitten oluşan çözelti hazırlanmış ve 30°C sıcaklıkta ve yaklaşık 2 saat süresince manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Oluşturulan bu çözelti hiç bekletilmeden daha önceden hazırlanmış Si/ Alimuna kalıpların üzerlerine bu yöntemle kaplanmıştır. Dakikadaki dönüş hızları 500, 1000, 2000 devir olarak değiştirilmiş ve farklı alttaşlar elde edilmiştir.

3.1.3 Si/SiO₂ İnce Filmlerin Mıknatıssal Püskürtme (Magnetron Sputtering) Yöntemi ile Kobalt Katalizörle Kaplanması

Püskürtme sisteminde temel olarak kaplama yapılacak alttaşın anot kaplanılacak hedef madde ise katot olacak şekilde yerleştirilir. Bu sayede hedefin tam yüzeyinde bir plazma alan oluşturur. Bu plazma tarafından yakalanan elektronlar taşıma gazının iyonlaşmasını sağlar. Bu şekilde sistemin çalışma süresince gereken iyonlaşmış gaz sürekliliğini korumuş olur. Yüzeyden kopan atomlar alttaşların üzerinde düzgün dağılımlı bir şekilde biriktirilir. **Şekil 3.3'** de püskürtme sisteminin şematik görünümü verilmiştir [26].



Şekil 3.3. Püskürtme sistemi [26]

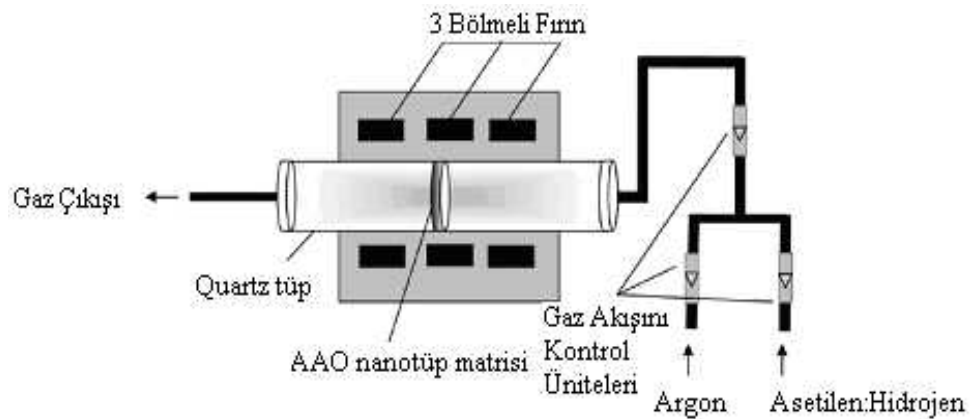
İnce film tekniklerinde arasında oldukça kullanışlı bir yöntem olan püskürtme yöntemi ile hemen hemen her madde kaplanabilir. Eşit yoğunlukta ve düzenli bir şekilde kaplayabilme özelliği bu yöntemi en önemli avantajlarından biridir. Bu metot bir plazma içerisinde kaplanacak maddenin iyonlarının bombardıman edilmesiyle oluşur. Taşıma gazı olarak genellikle argon kullanılır. Ağır argon iyonları kaplanacak maddenin iyonlarına çarpar ve yüksek hızda hareket etmelerini sağlar. Bombardıman edilen iyonlar ve kaplanacak maddenin atomlarının momentum transferi ile yüzeyden kopmasına sebep olur.

Radyo frekansı püskürtme sisteminde düşük basınç altında iki elektrot arasında radyo frekansı kaynağından voltaj uygulanır. Bu sayede püskürtme sistemi için gereken plazma ve iyonlaşmış gaz elde edilmiş olur. DC gerilim uygulandığında ise hedef yüzeyden ayrılan iyonlar alttaş üzerine birikir.

Bu çalışmada Si/SiO₂ yüzeylerine RF püskürtme yöntemi kullanılarak kobalt ince film kaplamıştır. Co ince film karbon nanotüplerin daha hızlı büyüebilmesi için katalizör görevi görür. Katalizör parçacıkları oluşacak nanotüplerin çaplarının büyüklüğü açısından da önem taşır.

3.1.4 Karbon Nanotüplerin İnce Filmler Üzerinde Büyütülmesi

Si / SiO₂ ve Si / alümina ince filmlerin üzerlerine kobalt ince filmlerin kaplanması işleminden sonra üzerlerine karbon nanotüp depolanması için hazır hale getirilmiştir. Bu işlem sıcaklığı 600°C ve 700°C arasında değişen bir fırın ortamında gerçekleştirilmiştir. Karbon nanotüp oluşumunu başlatmak için fırının içine amonyak, azot, hidrojen gazlarından biri ve karbon içeren asetilen, etilen, etanol, metan gibi gazlar verilmelidir. Karbon içeren gazlar katalizör parçanın yüzeyinde parçalanır ve katalizörün yanına yapışır; sonuçta karbon nanotüpler metal katalizör etrafında büyür. Bu çalışmada hidrojen gazı ve karbon kaynağı olarak da asetilen gazı kullanılmıştır. **Şekil 3.4.**'de kullanılan CVD sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.4. Kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition-CVD) sistemi.

Bu çalışmada asetilen gazı kullanıldığı için oldukça dikkatli olunmalıdır. Asetilen ya da "etin" kolayca alev alan renksiz bir gazdır. Havada oldukça isli ve sarı

bir alevle yandığı halde oksijenle karıştırıldığı zaman göz kamaştıracak kadar parlak, akkor halinde bir alev verir. Saf asetilen hafif eter kokusundadır; ama saf olmayan ticari asetilen, içindeki katkıları nedeniyle sarımsak gibi kokar. Asetilen kararsız bir gazdır, ısınmayla birlikte hidrojen ve karbona ayrışır. Bu ayrışma, ısı yayar. Bu nedenle asetilen tüplerinin mümkün olduğunca serin bir ortamda tutulması gerekir. Ayrıca yanıcı bir gaz olduğu için havada % 2.5 oranında bulunduğu da patlayabilir. Deneyler sırasında önlem olarak asetilen tüpü fırından oldukça uzakta tutulmuştur.

Hidrojen ise renksiz ve kokusuz bir gazdır. Yanıcı bir gaz olan hidrojen ise havada % 4 oranında bulunursa patlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı fırının dışındaki ortama hiçbir şekilde gaz sızıntısı olmamasına dikkat edilmelidir. 10 sccm C_2H_2 ve 100 sccm H_2 gazı karışımı fırına gönderilmiştir. Gaz karışımlarının fırına gönderilmesi için teflon borular kullanılmıştır.

Öncelikle fırın sistemi 100 sccm azot gazı ile istenilen sıcaklığa çıkana kadar temizlenmiştir. Yukarıda da söylediğimiz gibi asetilen gazı $600^{\circ}C$ ve $700^{\circ}C$ gibi yüksek sıcaklıklarda hidrojen ve karbona ayrışacaktır. Reaksiyon sonunda oluşan hidrojen gazı kuartz tüpün gaz çıkışından havaya yayılır. Karbon ise hazırladığımız alttaşlar üzerinde birikir.

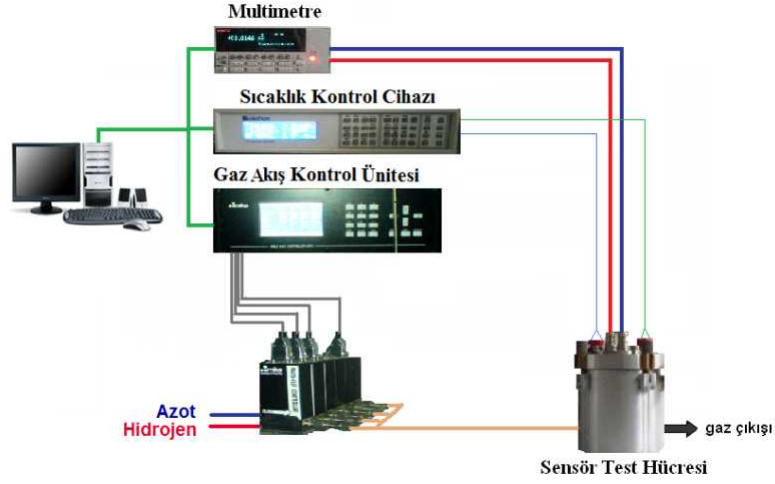
3.2 Gaz Algılama İşlemleri

Karbon nanotüplerin elektriksel özelliklerini ve gaz algılama ölçümlerinin yapılmasında kullanılan ölçüm sistemi **Şekil 3.5**'te gösterilmiştir.

Bu ölçüm sisteminde malzeme üzerinden gaz geçişi sağlanırken dış ortamla etkileşmesini önleyecek kapalı bir ölçüm hücresi bulunur. Ölçüm hücresi, alüminyumdan imal edilmiştir. Hücresinin kapağında gaz sızdırmazlık elemanı olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı O-ring kullanılmıştır.

Ölçüm hücresinin, kontrollü bir şekilde gaz giriş ve çıkışını sağlayacak gaz akış kontrol ünitesine (MKS), bağlantısı için teflon borular kullanılmıştır. Hücre içerisinde gaz ölçümü yapılacak örneklerin sıcaklığını tespit edebilmek için termoçift bağlantı uçları, sıcaklığın ayarlanabilmesi için ısıtıcı elemana ait bağlantı uçları ve elektriksel bağlantılar için metal konnektörler bulunur.

Gaz geçişinin istenilen sıcaklıkta sağlanmasıyla oluşan kimyasal tepkimenin nedeni ile değişim gösteren elektriksel özelliklerin gözlemlenmesi için elektrometreden veya bir multimetreden yararlanılmıştır. Elde edilen veriler bir bilgisayar programı ile incelenebilir.



Şekil 3.5 Ölçüm sisteminin şematik görünümü.

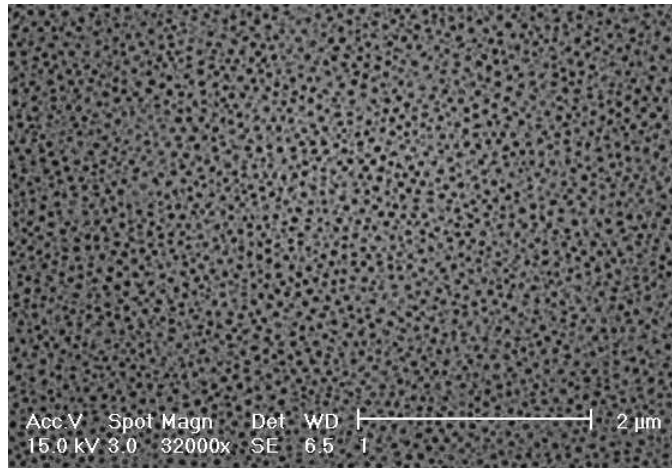
Si/SiO₂ ve Si/ alümina yüzeyler üzerine biriktirilen karbon nanotüplerin filmler yüzeyden sıyrılarak örnekler silisyum/silisyum dioksit tutucu üzerine yerleştirilmiştir. Üretim aşamasında kullanılan alttaşlarda kobalt ince film bulunduğu için ve kobaltın iletkenliğinden dolayı ölçümleri etkileyebileceğinden gaz ölçümü aşamasında karbon tabakalar alttaşlardan ayrılmıştır. Gaz geçişini sağlanması için örnekler ölçüm hücresine yerleştirilmiştir. Örnek tutucuyla bağlantının sağlanabilmesi için gümüş pasta kullanılmıştır. Sıcaklık kontrol cihazının kullanımıyla sabit sıcaklık ortamında tutulmuşlardır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tezde, her aşamanın sonucunda, elde edilen yüzeylerin Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Elektron Microscope – SEM) analizleri yapılmıştır. Katalizör kaplama çalışmaları sonucunda da yüzey üzerinde kobalt oluşumunu anlamak için EDX analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Si/ Alümina Alttaşılarının İncelenmesi

Si/ Alümina alttaşların hazırlanabilmesi için öncelikle silisyum yüzeyine buharlaştırma yöntemi ile alüminyum ince film kaplanmıştır. Al/Si yapısının hazırlamak için, Leybold Univax vakumlu kaplama sisteminde, 10^{-6} mbar vakumda, 3µm kalınlıkta Al film kaplanmıştır. Oluşan Al/Si yapısındaki örneklerin yüzeyinde oksit tabaka oluşturmak için örnekler, güç kaynağına bağlanarak 1 saat süresince 0.3M oksalik asitte, 0°C sıcaklıkta ve V=40V sabit gerilim altında anodizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen Si/ Alümina ince filmlerin üzerlerine kobalt katalizör kaplaması yapılmadan önce SEM analizi yapılmıştır. **Şekil 4.1**'de Si/Alümina yüzeyinin SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.1 Anodizasyon sonrasında oluşan Si/ Alümina tabanlı nanogözeneklerin yüzey görüntüsü

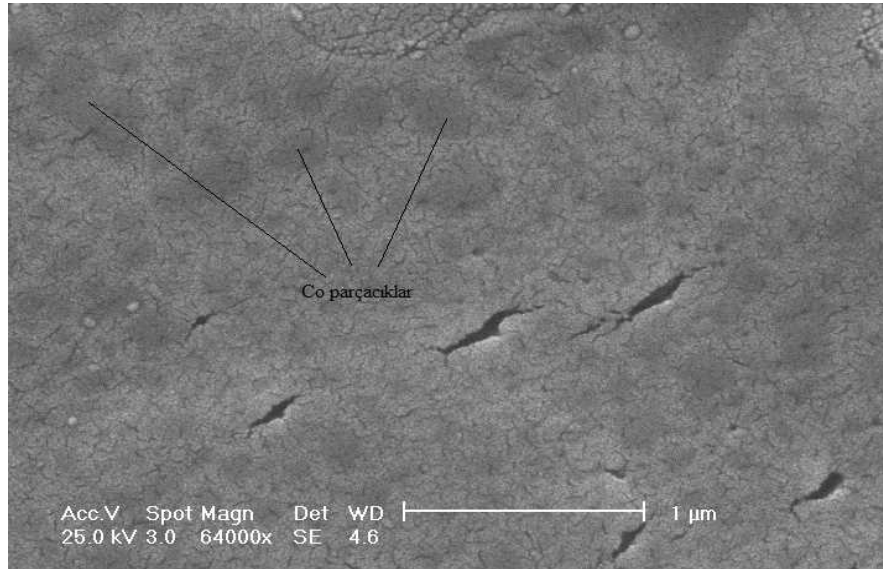
Si/Alümina yüzeyine uygulanan anodizasyon gerilimi, oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda alüminyumun Al_2O_3 haline geçmesine sebep olur. Bu kimyasal reaksiyon, oluşan Al_2O_3 filminde gözenekler meydana getirir. **Şekil 4.1**'de 40 V sabit gerilimde, $0^{\circ}C$ sıcaklıktaki oksalik asitte büyütülerek elde edilen Si/Alümina yüzeyinin gözenekli yapının elde edildiği anlaşılmıştır. Yaklaşık 50 nm çapında altıgen gözenekler elde edilmiştir.

Ardından, arzu edilen malzeme (metal, yarıiletken, vb.) bu oluşan gözenekli yüzeye kaplanabilir. Bu çalışmada kullanılan karbon nanotüplerin sentezinde katalizör olarak kullanılan kobalt ince film elde edilen Si/ Alümina yüzeye kaplanmıştır.

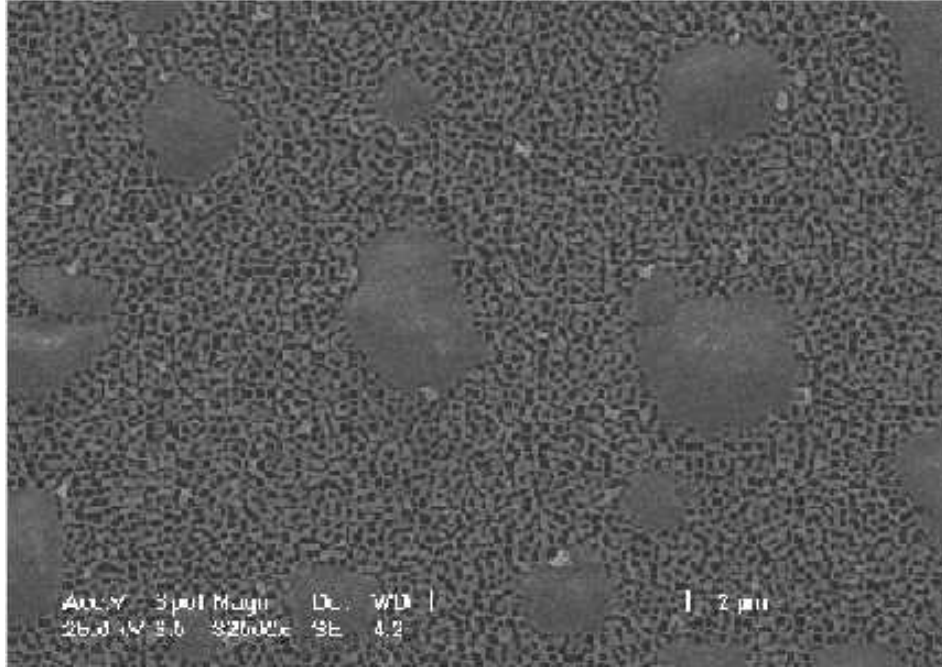
4.2. Kobalt Katalizörle Kaplanan Yüzeylerin Analizi

Si/ Alümina ince filmler üzerine spin kaplama yapımı için hazırlanan 240 g/L $CoSO_4 \cdot 7H_2O$, 40 g/L HBO_3 ve 1 g/L askorbik asitten çözeltisi Si/ Alimuna kalıpların üzerlerine dakikadaki dönüş hızları 500, 1000, 2000 devir olarak değiştirilmiş ve farklı alttaşlar elde edilmiştir.

Si / alümina ince filmlerin üzerlerine spin kaplama yöntemi ile kobalt kaplandıktan sonra elde edilen örneklerin EDX analizleri yapılmış ve bu örneklerin Taramalı Elektron Mikroskobu'nda yüzey görüntüleri elde edilmiştir.

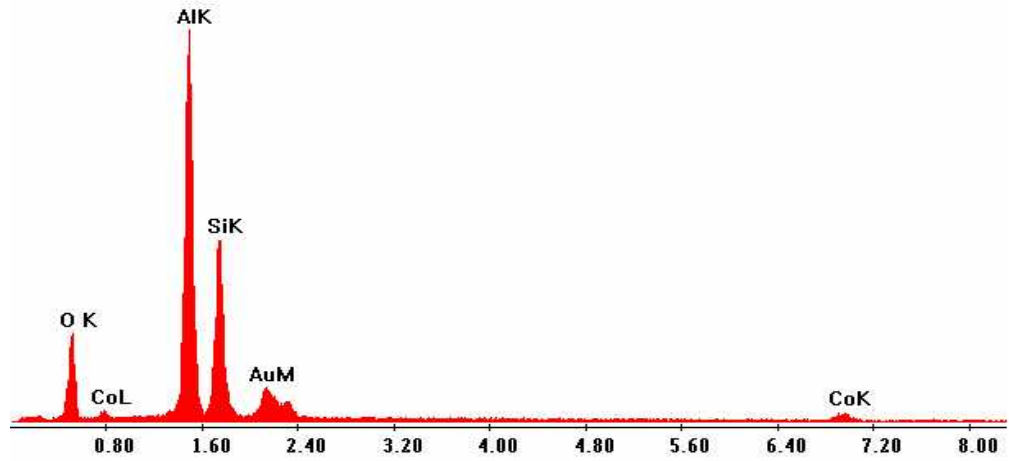


Şekil 4.2 Alümina ince film yüzeyine kaplanan kobalt filmin SEM görüntüsü.



Şekil 4.3 Alümina ince film yüzeyinde gözenekler üzerine kaplanan kobalt parçacıkların filmin SEM görüntüsü

Şekil 4.2’ de Spin kaplama yöntemi ile hazırlanan kobalt çözeltisi alümina ince film kaplanmıştır. Şekil 4.3’ te ise Co parçacıkların gözenekler üzerinde adacık şeklinde dağıldığı gözlenmiştir. Alt kısımda alümina ince filmin gözenekli yapısı görülmektedir.



Şekil 4.4 Si/Alümina/kobalt film örneğinin EDX analizi.

Şekil 4.4’ de elde edilen Si/ Alümina/Co yapısının yüzeyinin EDX analizi gösterilmektedir. Kobalt parçacıklar yüzeyde damlalar halinde koyu renkte görülmektedir. Yüksek çözünürlük sağlayabilmek için yüzeye yüksek voltaj

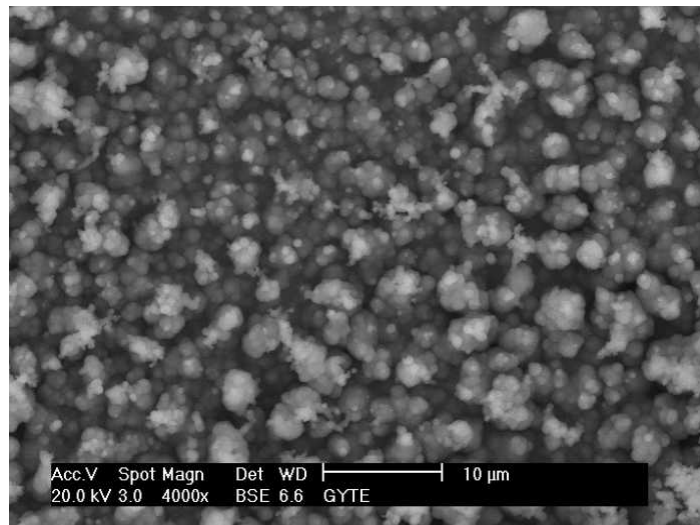
verilmelidir. Bu durumda örneğin yüzeyinin hasar görmemesi için yüzeye altın kaplama yapılmıştır. Elde edilen EDX görüntüsünde alüminyum, oksijen, silisyum, spin kaplama ile yapılan kobalt ve altın yoğunlukları görülmektedir.

4.3. Elde Edilen Karbon Nanotüplerin Analizleri

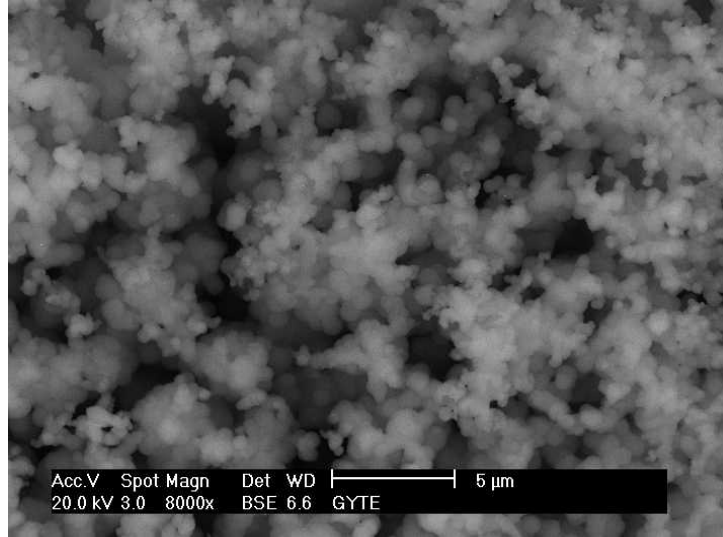
Si/SiO₂ ve Si/ Alümina yüzeyler üzerinde elde edilen karbon nanotüplerin boyutlarının gözlemlenebilmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri alınmıştır. Elde edilen görüntüler sonucunda çapları 50-100 nm arasında değişen karbon nanotüpler ve değişik büyüklüklerde karbon nanoküreler gözlemlenmiştir.

Daha önce de belirttiğimiz gibi karbon nanotüplerin büyütülmesinde katalizör kaplanması nanotüp boyutları açısından oldukça önemlidir. Ayrıca elde edilen görüntüler doğrultusunda H₂ ve C₂H₂ gazlarının geçiş süresinin artmasının nano parçacıkların boylarında etkili olduğu anlaşılmıştır.

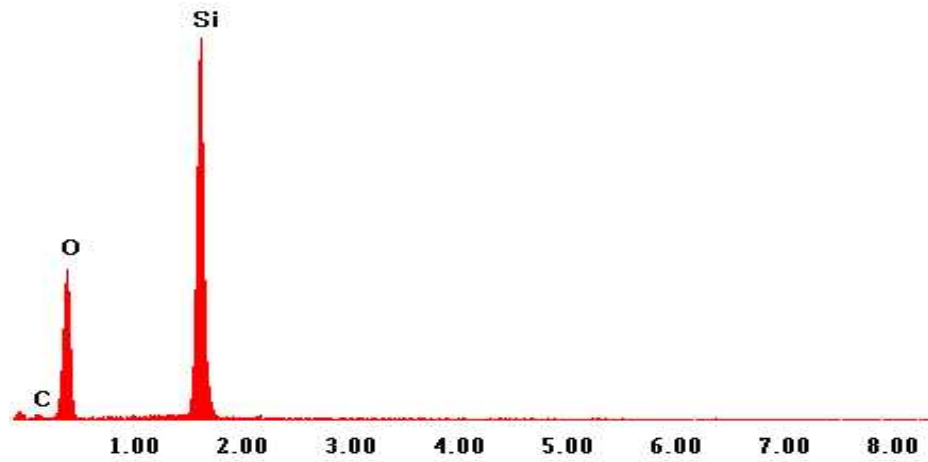
Bu örneklerde alttaşlar öncelikle fırın içerisine yerleştirilmiş ve fırın sıcaklığı istenilen seviyeye çıkana kadar (600°C-700°C) 100 sccm azot gazı verilmiştir. Bu uygulamanın amacı karbon nanotüp üretimi için fırın içerisinde temiz bir ortam sağlayabilmektir. Bu aşama yaklaşık 30 dakika sürmektedir. Daha sonra 10sccm asetilen ve 90 sccm hidrojen gazları gönderilmiştir. **Şekil 4.5**'te ve **Şekil 4.6**'da 30 dakika süresince asetilen ve hidrojen gazı karışımının geçişi ile Si/SiO₂/Co ince film üzerinde oluşan nanokürelerin SEM analizleri gösterilmektedir. **Şekil 4.7.**'de ise yüzeyin EDX analizi görülmektedir.



Şekil 4.5 30 dakika süresince 10 sccm asetilen ve 90 sccm hidrojen gazı gönderilen Si/SiO₂/Co ince film üzerinde oluşan karbon nanoküreler.

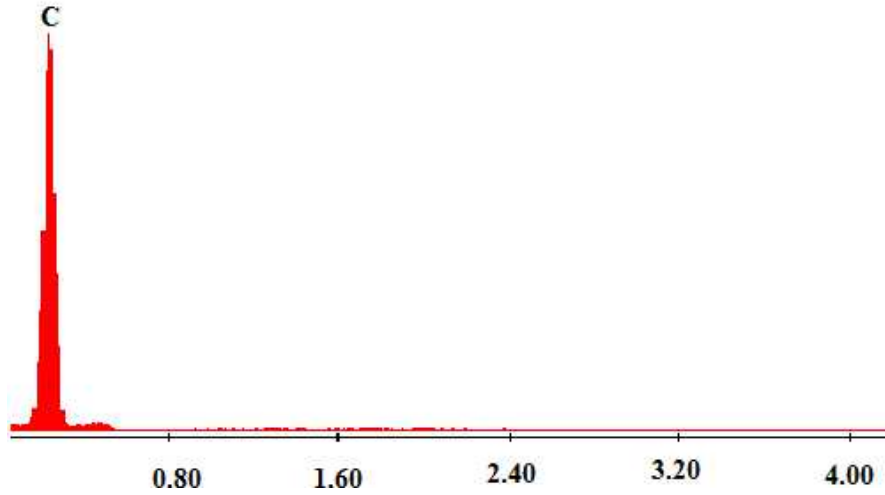


Şekil 4.6 30 dakika süresince 10 sccm asetilen ve 90 sccm hidrojen gazı gönderilen Si/SiO₂/Co ince film üzerinde oluşan karbon nanoküreler.



Şekil 4.7 Si/SiO₂ ince filmin üzerinde karbon nanotüplerin EDX görüntüsü.

Elde edilen karbon nanotüpler Si/SiO₂ yüzeyinde siyah bir tabaka oluşturmuştur ve bazı örneklerde bu tabaka karbon bir pens yardımı ile alttaşın yüzeyinden ayrılmıştır. **Şekil 4.8.**'de bu örneklerin EDX analizi gösterilmektedir. Bu nedenle sadece karbon elementi görülmektedir.



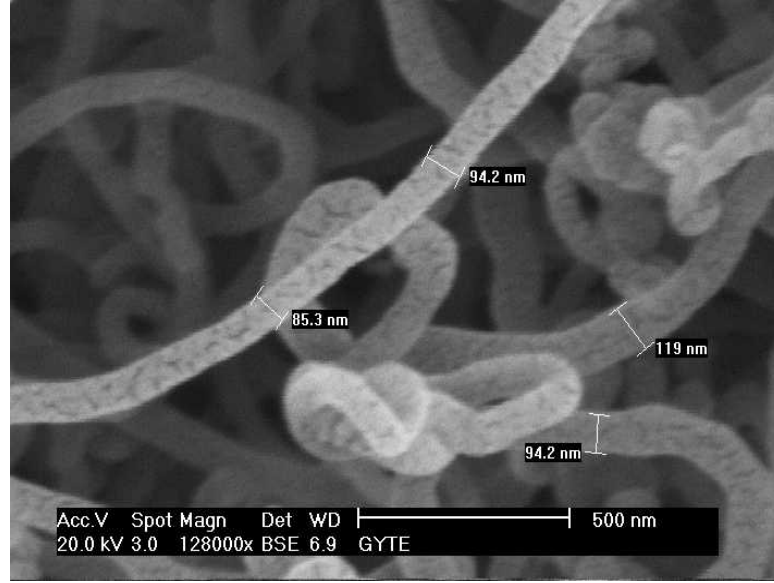
Şekil 4.8. Karbon nanotüplerin EDX görüntüsü.

Elde edilen bulgular neticesinde oluşan karbon nanokürelerin daha da büyüebilmesi ve düzgün nanotüpler meydana gelmesi için Kimyasal Buhar Biriktirme aşamasının süresinin uzatılarak ve daha fazla karbon birikimi sağlanmıştır. **Şekil 4.9.**'de 3 saat süresince Si/SiO₂/Co yüzeylere 10 sccm asetilen ve 90 sccm hidrojen gönderilerek elde edilen karbon nanotüplerin SEM görüntüleri verilmektedir. Spagetti görünümünde ve çapları 90nm – 100nm arasında değişen karbon nanotüpler elde edilmiştir.



a)

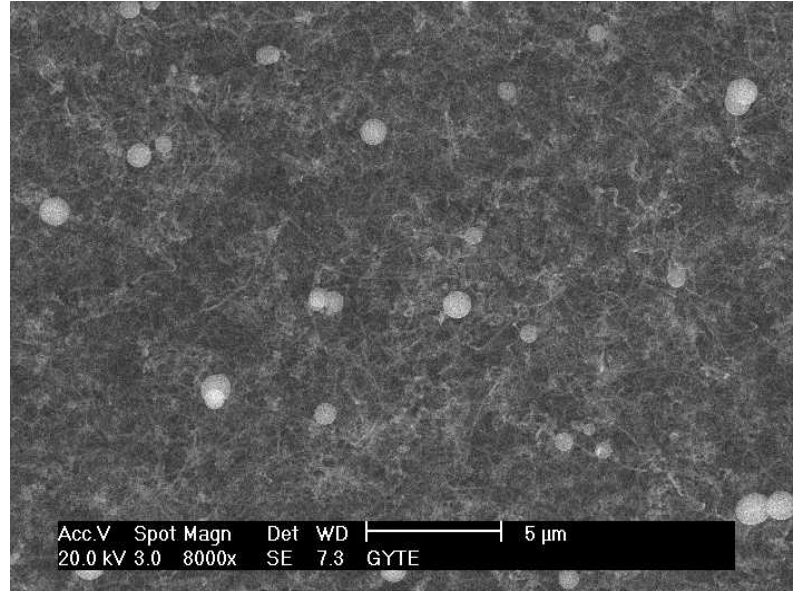
Şekil 4.9 a) Si/SiO₂/Co ince filmin üzerinde 3 saat süresince büyütülen karbon nanotüplerin SEM görüntüsü.



b)

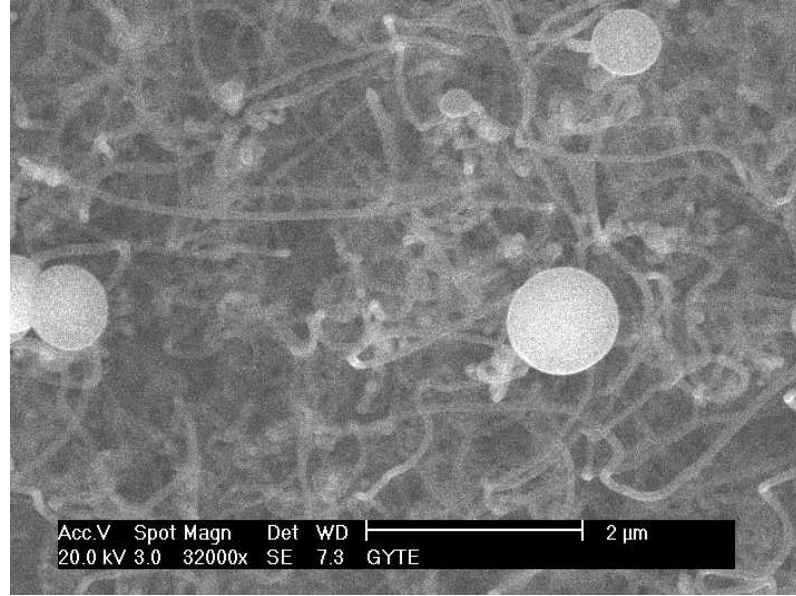
Şekil 4.9 b) Si/SiO₂/Co ince filmin üzerinde 3 saat süresince büyütülen karbon nanotüplerin yüksek büyütme SEM görüntüsü.

Şekil 4.10' da Si / Alümina üzerinde büyütülen karbon nanotüplerin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu örneklerle SEM analizi öncesinde altın kaplama yapılmadığından yüksek çözünürlükte görüntü elde edilememiştir.



a)

Şekil 4.10 a) Si / Alümina/ Co ince filmlerin üzerinde oluşan karbon nanotüplerin SEM görüntüsü.



b)

Şekil 4.10 b) Si / Alimuna/ Co ince filmlerin üzerinde oluşan karbon nanatüplerin yüksek büyütme SEM görüntüsü.

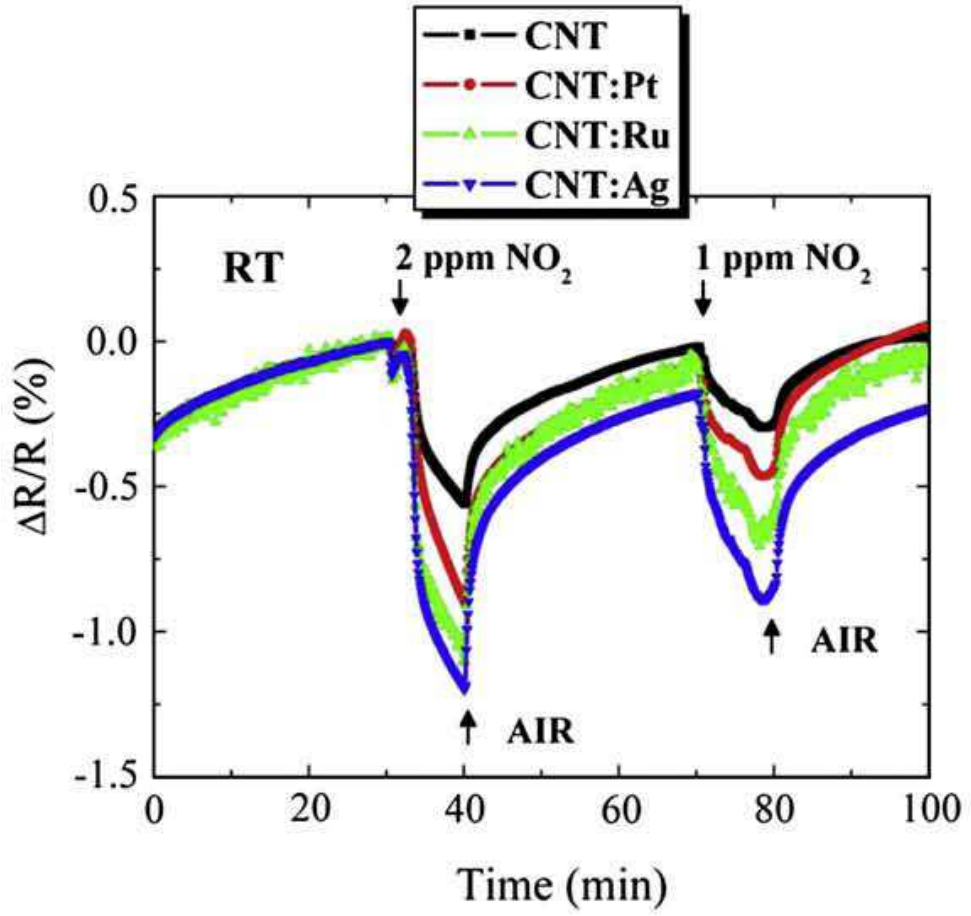
4.4. Gaz Ölçümü Analizleri

Bu bölümde, elde edilen karbon nanotüp örneklerinin NO_2 , H_2 , nem ve etanol gazlarını algılama özellikleri incelenmiştir. Bu yapıların yüzeylerine değişik konsantrasyonlarda ve farklı sıcaklıklarda gaz gönderilerek zamana karşılık direnç değişimi (R-t) grafiği ile gözlemlenmiştir.

4.4.1. 23°C sıcaklıkta NO_2 ölçümü

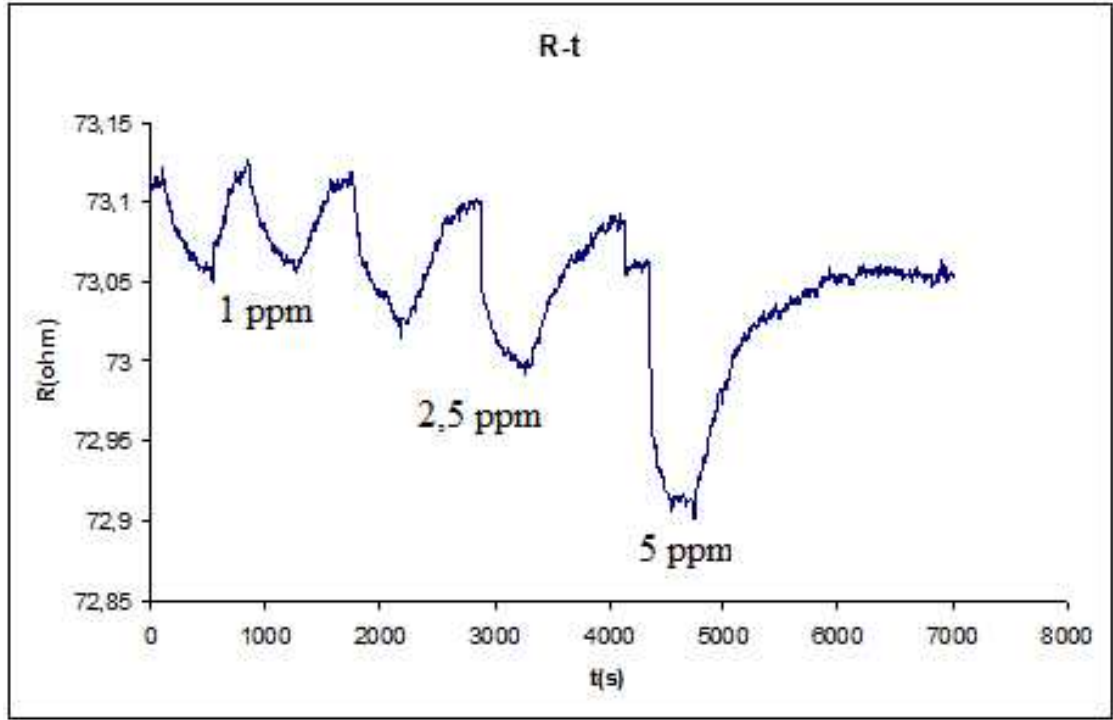
Literatür araştırmalarına göre oda sıcaklığında karbon nanotüpler NO_2 gazını oldukça iyi algılayabilmektedir. **Şekil 4.11**'de karbon nanotüplerin kaplama yapılmadan ve iki ucuna platin, rutanyum ve gümüş malzemeleriyle kaplanarak kontak alınması ile yapılan sensörlerin oda sıcaklığında NO_2 gazını ölçümü grafiği verilmiştir. Ayrıca gümüş kontak alımı ile gaz ölçümlerinde en iyi duyarlılık gözlemlenir. Gümüş kontak alınarak yapılan sensörün oda sıcaklığındaki gaz ölçümünde direnç değişimi 1ppm NO_2 gazı için % 0,88, 2 ppm için ise %1.19'dur. Bu bilgilere göre karbon nanotüplerin NO_2 ölçümünde gaz konsantrasyonu arttıkça

duyarlılığı da artmaktadır. Tekrar hava ile hücre içerisi temizlenirken direnç artarak eski haline dönmektedir [27].



Şekil 4.11. Karbon nanotüplerin 23°C’de NO₂ gazının konsantrasyonuna bağlı zamana karşılık direncin değişimi (($\Delta R/R$)-t) grafiği [27].

Bu bilgiler doğrultusunda üretilen karbon nanotüpler iki ucundan gümüş pasta ile kontak alınarak gaz ölçüm hücresine yerleştirilmiştir. Karbon nanotüp yüzeyine 23°C sıcaklıkta NO₂ gazının konsantrasyonu değiştirilerek zamana karşılık direnç değişimi ölçülmüştür. **Şekil 4.12’** de bu değişim verilmiştir.



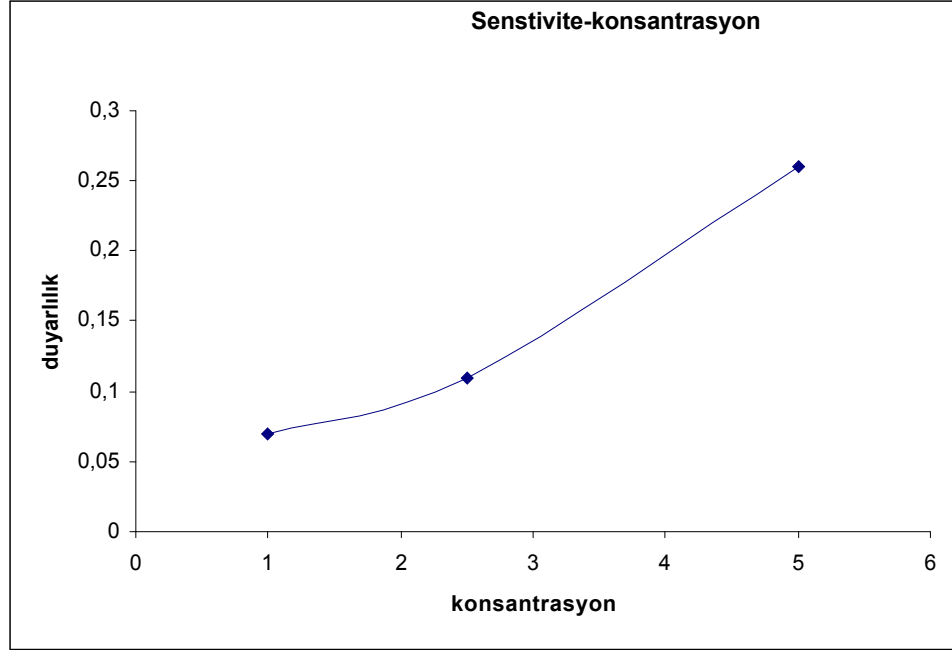
Şekil 4.12 Karbon nanotüplerin 23°C’de NO₂ gazının konsantrasyonuna bağlı zamana karşılık direncin değişimi (R-t) grafiği

Elde edilen karbon nanotüplerin üzerinden farklı konsantrasyonlarda NO₂ ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Örnekler hücreye yerleştirildikten sonra öncelikle hücrenin temizlenmesi için azot gazı gönderilmiştir. Bu süreçte karbon nanotüplerin direnci artmaktadır. Bu artış sabitlendiğinde hücre içersine 1 ppm NO₂ gazı gönderilmiştir. NO₂ gazı gönderildiğinde direncin zamanla azaldığı gözlemlenmiştir. Direnç sabitlendiğinde tekrar azotla temizlenmiş ve direnç değişiminde tekrar artış gözlemlenmiştir. Daha sonra sırası ile 2,5 ppm ve 5 ppm konsantrasyonlarında NO₂ gazı gönderilmiş ve aynı değişim gözlemlenmiştir. Bu durumda elde edilen karbon nanotüplerin NO₂ gazı algılamak için geri dönüşüm özelliği olduğu anlaşılmıştır.

Karbon nanotüplerin NO₂ gazına duyarlılığını anlamak için konsantrasyonla duyarlılığın değişiminin grafiği **Şekil 4.13**’te gösterilmektedir. Duyarlılık (S) aşağıdaki Formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S = \left(\frac{R_0 - R}{R} \right) \times 100$$

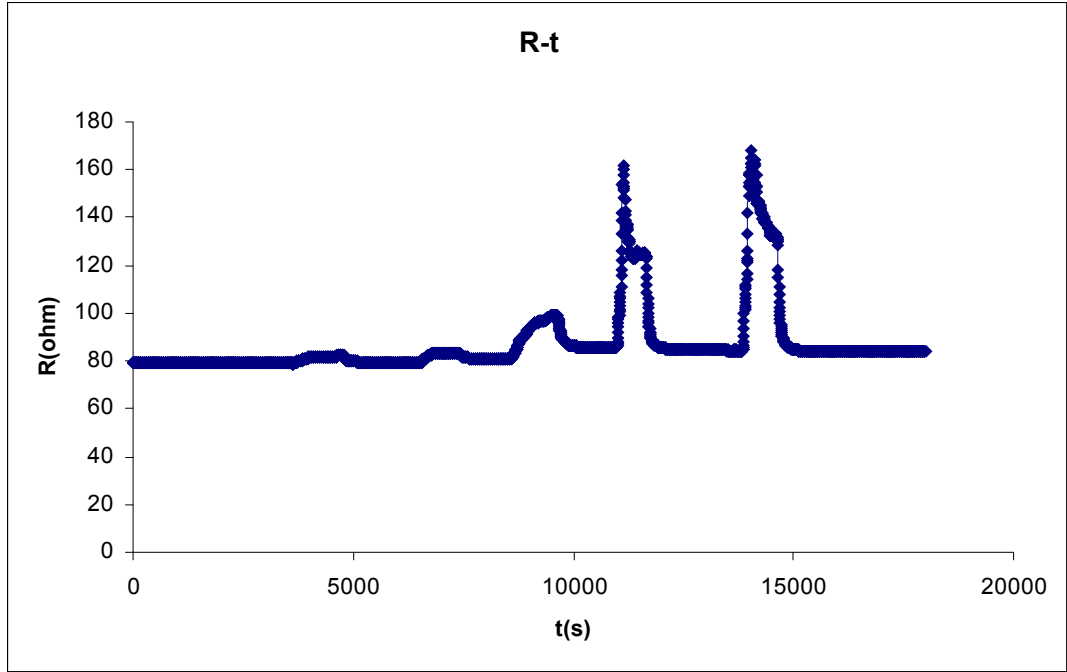
Şekilde görüldüğü gibi karbon nanotüplerin oda sıcaklığında NO_2 gazına duyarlılığı gaz konsantrasyonu ile artış göstermektedir. Beklendiği gibi gaz konsantrasyonunun artışı duyarlılığın da artmasını sağlamıştır.



Şekil 4.13 23°C'de NO_2 gazının konsantrasyonuna karşılık duyarlılık grafiği

4.4.2. 25°C sıcaklıkta %0,75 konsantrasyonunda nem ölçümü

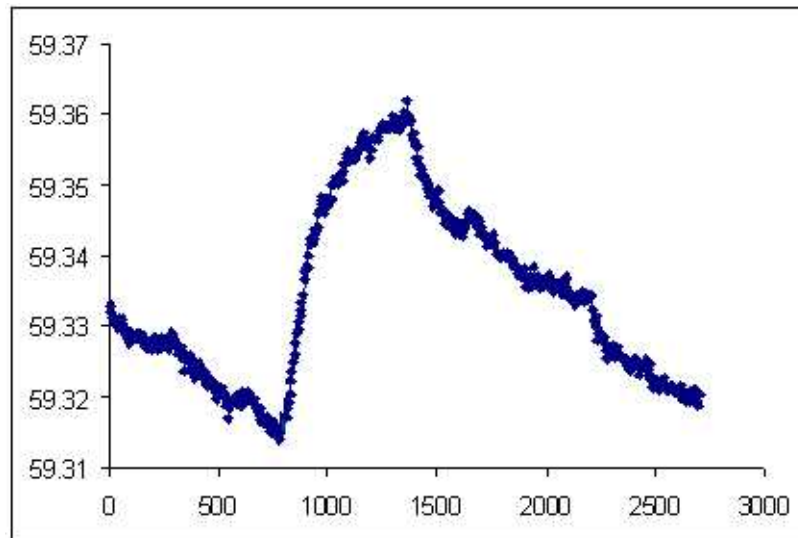
Elde edilen karbon nanotüplerin üzerinden 25°C'de ve düşük konsantrasyonda nem ölçümü yapılmıştır. Nem konsantrasyonu %0,75 olarak sabit tutulmuş ve gaz geçişi süresince direnç değişimi gözlemlenmiştir. Şekil 4.14'te zamanla direnç değişiminin grafiği gösterilmektedir. İlk önce hücrenin içerisini temizlemek için azot kullanılmıştır. Azot geçişi sırasında direnç sabittir. Nem geçişi ile dirençte artış gözlemlenmiştir. Hücre tekrardan azotla temizlendiğinde direnç ilk haline dönmüştür.



Şekil 4.14. 25°C sıcaklıkta %0,75 konsantrasyonunda nemin zamana karşılık direnç değişimi grafiği.

4.4.3. 150°C’de H₂, etanol ve Nem Ölçümleri

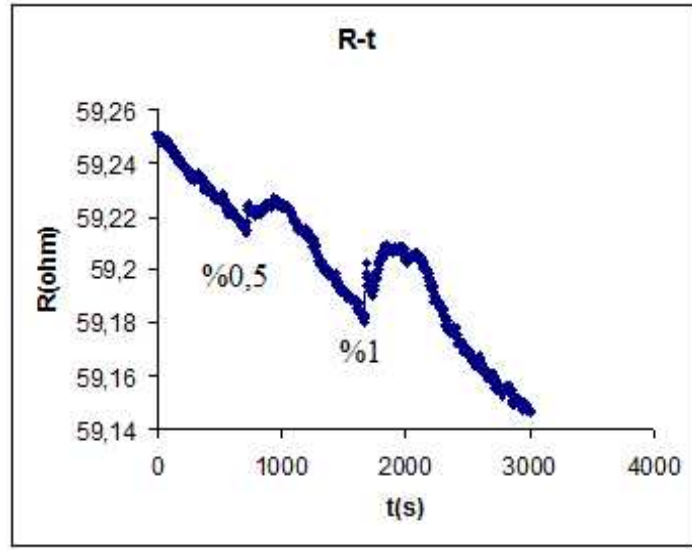
Karbon nanotüpler üzerinde 150°C’de belli konsantrasyonlarda hidrojen, etanol ve nem geçirilerek zamanla direnç değişimleri gözlemlenmiştir. **Şekil 4.15’de** 150°C sıcaklıkta 1000 ppm etanol geçişi sağlanarak zamanla direncin arttığı gözlemlenmiştir.



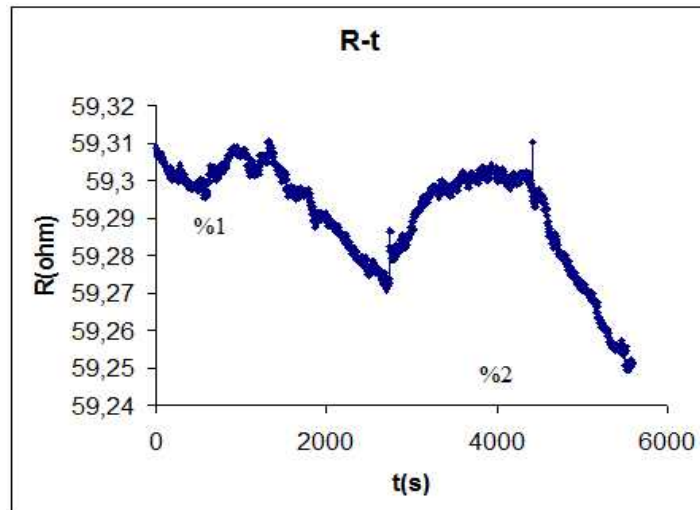
Şekil 4.15. 150°C 1000 ppm etanol ölçümü

Aynı şekilde 150°C’de %0,5 ve %1 konsantrasyonlarında hidrojen ölçümünde de direnç artışı görülmüştür. Fakat elde edilen karbon nanotüpler kullanılarak bu sıcaklıkta tekrarlanabilir bir hidrojen ölçümü elde edilememiştir. **Şekil 4.16**’da karbon nanotüplerin 150°C’de hidrojen gazı ölçümünün zamana karşılık direnç değişimi grafiği gösterilmektedir.

Örnekler hücre içerisine yerleştirilerek azot gazı ile hücre ortamı temizlenmiştir. Daha sonra sırası ile %0,5 ve %1 konsantrasyonlarında hidrojen gazı gönderilmiş ve bu süreçte karbon nanotüplerin direnci artmıştır.



Şekil 4.16. 150°C de H₂ ölçümü



Şekil 4.17 150°C nem ölçümü

5. SONUÇ VE YORUM

Bu bölümde, karbon nanotüplerin üretilmesi ve gaz sensörü özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılan karakterizasyonlar ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar tartışılıp değerlendirilmiştir.

5.1. Kobalt Kaplanması Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında, karbon nanotüplerin büyütülmesini hızlandırılması amacı ile Si/Alümina üzerine Spin kaplama yöntemi ve Si/SiO₂ üzerine de Püskürtme yöntemleri ile kobalt ince film kaplanmıştır. Her iki yöntemle de yüzeylerin karakterizasyon sonuçlarına göre literatür bilgilerine uygun kobalt ince filmler elde edilmiştir.

5.2. Karbon Nanotüp Üretimi Aşamasının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada Kimyasal Buhar Biriktirme yöntemi kullanılarak karbon nanotüpler elde edilmiştir. Hazırlanan kobalt katalizörle kaplanan alttaşlar üzerinde makarna görünümünde karbon nanotüpler elde edilmiştir. İlk denemelerde nanotüp elde etmek için kullanılan asetilen ve hidrojen gaz geçişlerinde karbon nanoküreler gözlemlenmiş ve bu nedenle geçiş süresinin arttırılmasına karar verilmiştir. 3 saat boyunca gaz geçişi sağlandığında çapları 90nm-100nm arasında değişen nanotüpler elde edilmiştir. Kobalt katalizör kaplanmasının nanotüplerin çapında ve boylarında önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen SEM görüntüleri sonucunda karbon nanotüplerin çapları oldukça büyüktür. Bunu nedeni olarak üretim sırasında ortamdan gelen kirlilik ve amorf karbon olduğu düşünülmektedir.

5.3. Karbon Nanotüplerin Gaz Algılama Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Karbon nanotüplerin gaz algılama özelliklerinin incelenmesi sonucunda, elde edilen nanotüplerin oda sıcaklığında 1 ppm'den yüksek konsantrasyonda NO₂ gazını

algıladığı belirlenmiştir. 23°C sıcaklıkta karbon nanotüplerden oluşturulan NO₂ gaz sensörünün duyarlılığı, gaz konsantrasyonu ile artmaktadır. Ayrıca NO₂ gaz geçişi sırasında direncin azalıyor olması literatür araştırmalarına göre beklenen bir sonuçtur. Gaz konsantrasyonun artışı ile sensör duyarlılığı da artmaktadır. Azotla temizleme yapılırken ise direnç düşmüştür. NO₂ gazını algılama süresi ve azotla temizlemede geri dönüş süresi hemen hemen aynıdır. Bu nedenle algılama işlemleri tekrarlanabilir niteliktedir. Karbon nanotüplerin oda sıcaklığında nemi oldukça iyi ölçtüğü tespit edilmiştir. Duyarlılık yaklaşık %50'dir. 150°C'de etanol buharını algılama süresi geri dönüş süresinden oldukça kısadır. Yine literatür araştırmalarına göre etanol buharını algılamada direncin artıyor olması beklenen bir sonuçtur. Karbon nanotüpler 150°C'de hidrojeni algılamıştır. Fakat geri dönüşlerde tekrar aynı direnç değeri gözlemlenememiştir.

KAYNAKLAR

1. Cristina Buzea, Ivan Pacheco, and Kevin Robbie "Nanomaterials and Nanoparticles: Sources and Toxicity" *Biointerphases* 2 (1007) MR17-MR71.
2. Hugh Aldersey-Williams, *The Most Beautiful Molecule: The Discovery of the Buckyball*
3. Iijima, S. (1991) Helical Microtubules of Graphitic Carbon, *Nature*, Vol.354, pp.56-58
4. Handbook of modern sensor: physics, designs, and applications / Jacob Fraden, American Institute of Physics, 1997.
5. Ulrich Schlecht, Kannan Balasubramanian, Marko Burghard and Klaus Kern "Electrochemically decorated carbon nanotubes for hydrogen sensing" *Applied Surface Science*, 253,20, 15August2007,8394-8397.
6. Sun Wen, Sun-il Mho, In-Hyeong Yeo, "Improved electrochemical capacitive characteristics of the carbon nanotubes grown on the alumina templates with high pore density", *Journal of Power Sources* 163 (2006) 304–308.
7. Sun Wen, Mi Jung, Oh-Shim Joo, Sun-il Mho, "EDLC characteristics with high specific capacitance of the CNT electrodes grown on nanoporous alumina templates", *Current Applied Physics* 6 (2006) 1012–1015.
8. Wanliang Mi, Y.S. Lin, Yongdan Li, "Vertically aligned carbon nanotube membranes on macroporous alumina supports", *Journal of Membrane Science* 304 (2007) 1–7.
9. Saito, R., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M.S. *Physical Properties Of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, London. Saito et al., 1998
10. William D. Callister, Jr, "Materials Science and Engineering: An introduction" , *New York, John Willey & Sons, 2002.*
11. Bilim ve Teknik, Ocak 2008, s. 58-60
12. L. X. Zheng et al. (2004). "Ultralong Single-Wall Carbon Nanotubes". *Nature Materials* 3: 673–676
13. Ebbesen, T.W. and Ajayan, P. M. (1992) Large-scale Synthesis of Carbon Nanotubes, *Nature*, Vol.358, pp.220–222.
14. R.Saito G.Dresselhaus M S Dresselhaus , *Physical Properties Of Carbon Nanotubes*

15. M S Dresselhaus, G Dresselhaus and P C Eklund 1996 *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes* (Academic Press, New York)
16. T Ebbesen 1997 *Carbon Nanotubes: Preparation and Properties* (CRC Press, Boca Raton, Florida) M Endo 1995 Special issue *Carbon*
17. Yasuda, A. Kawase, N. Banhart, F., Mizutani, Shimizu, T. and Tokumoto, H. (2002) Formation Mechanism of Carbon-Nanocapsules and -Nanoparticles Based on the In-Situ Observation, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol.106 (6), pp.1247–1251.
18. Daenen, M., Fouw, de R.D., Hamers, B., Janssen, P.G.A., Schouteden, K. and Veld, M.A.J. (2003) *The Wondrous World of Carbon Nanotubes: A Review of Current Carbon Nanotube Technologies*, Eindhoven University of Technology, 93 pp.
19. Yusuf Selamat and Gorkem Yuce, “Growth and Characterization of Carbon Nanostructures”, *Sixth International Conference of the Balkan Physical Union*(2007)
20. Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D.T. and Smalley, R.E. (1995) Catalytic Growth of Single-wall Carbon Nanotubes by Laser Vaporization, *Chemical Physics Letters*, Vol.243, pp.49-54.
21. Yudasaka, M., Rie, K., Matsui, T., Ohki, Y., Yoshimura, S. and Ota, E. (1995) Specific Conditions for Ni Catalyzed Carbon Nanotube growth by Chemical Vapor Deposition, *Applied Physics Letters*, Vol. 67(17), pp.2477-2479.
22. Yudasaka, M., Rie, K., Ohki, Y., Yoshimura, S. and Ota, E. (1997) Behavior of Ni in Carbon Nanotube Nucleation, *Applied Physics Letters*, Vol.70(14) pp.1817-1818
23. M. Penza, R. Rossi, M. Alvisi, M.A. Signore, G. Cassano, D. Dimaio, R. Pentassuglia, E. Piscopiello, E. Serra, M. Falconieri, “Characterization of metal-modified and vertically-aligned carbon nanotube films for functionally enhanced gas sensor applications”, *Thin Solid Films*, 2007
24. M. Meyyappan, *Carbon Nanotubes Science And Applications* (NASA Ames Research Center Moffett Field, CA) 2005
25. <http://w3.balikesir.edu.tr/~rcapan/Spin.htm>
26. Ohring, M., 2002. *Material Science of Thin Films*. (Academic Press, San Diego)

27. M. Penza, R. Rossi, M. Alvisi, M.A. Signore, G. Cassano, D. Dimaio, R. Pentassuglia, E. Piscopiello, E. Serra, M. Falconieri, “Characterization of metal-modified and vertically-aligned carbon nanotube films for functionally enhanced gas sensor applications”, *Thin Solid Films*, 2009

ÖZGEÇMİŞ

Görkem Yüce 1981 İstanbul’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul’da tamamladıktan sonra 2000 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünü kazanarak Fizik Lisan eğitimine başladı. 2006 yılında lisans eğitimini tamamlayarak aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü’ne kabul edildi ve yüksek lisans eğitimine başladı. Halen yüksek lisans öğrenimine devam etmekte ve Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü Sensör Laboratuvarı’nda proje asistanı olarak görev almaktadır.